

**Estudio de las tecnologías que aprovechan el recurso solar
para la generación de energía en edificios**

MEMORIA

Autora: Silvia Mata Gutiérrez

Director: Roberto Villafàfila Robles

Convocatoria: Mayo de 2016



Máster Interuniversitario UB-UPC
De Ingeniería en Energía

1 RESUMEN

La demanda energética que existe hoy día, sobre todo en países desarrollados, está aumentando para satisfacer un mayor número de necesidades. Uno de los mayores consumidores de energía es el sector de la edificación. Considerando que esta energía viene mayoritariamente de sistemas convencionales (no renovables), hacen que la tendencia a satisfacer un mayor número de necesidades en la sociedad, esté llevando a un aumento en la producción de CO₂ que se libera a la atmosfera favoreciendo el cambio climático.

Una de las soluciones para reducir el consumo energético en el sector de la edificación es el aprovechamiento de la energía del Sol para abastecer estas necesidades energéticas. A partir de esta premisa se ha centrado la realización de este trabajo.

Primeramente se ha estudiado la evolución del consumo de energía final para los últimos años en España y las fuentes de energía primaria para abastecer estos consumos. Posteriormente, en el sector de la edificación se han identificado los usos del consumo de energía final en térmicos y eléctricos, y las aplicaciones o tecnologías de utilización de esos usos.

Seguidamente se ha realizado un estudio cualitativo de las tecnologías solares disponibles en el mercado para ser implementadas como generadores de energía en los edificios. Las tecnologías solares se han identificado en dos grandes grupos, los sistemas solares pasivos y los sistemas solares activos.

El estudio se concluye con la representación de los datos experimentales registrados de dos plantas pilotos de captadores de concentración ejecutados en el proyecto europeo DIDSOLIT-PB. Uno de los sistemas está compuesto por un captador solar cilindro parabólico para la producción de agua caliente sanitaria y apoyo a la climatización en un edificio público de oficinas. El otro sistema está compuesto por un captador disco parabólico para la producción de energía eléctrica y térmica.

ÍNDICE

1	Resumen	8
2	Energía Solar en Edificios	14
2.1	Consumo energético en edificios	14
2.2	Uso de la energía solar	20
3	Tecnologías solares en la edificación	22
3.1	Tecnologías solares pasivas	22
3.2	Tecnologías solares activas	31
3.3	Ejemplos de implementación. Proyecto PSE-ARFRISOL	48
4	Casos experimentales	52
4.1	Aprovechamiento térmico	53
4.2	Aprovechamiento térmico y eléctrico: cogeneración	68
5	Conclusiones	82
6	Bibliografía/Referencias	83
	Referencias	83
	Bibliografía	84
7	Acta de evaluación	85

2 ENERGÍA SOLAR EN EDIFICIOS

Esta sección del documento se centra en el estudio de identificar el consumo final de energía útil de la demanda del sector de la edificación en España. Se ha estudiado la evolución de la demanda de energía final por sectores y por fuente de energía. Posteriormente se ha evaluado los usos finales de estos consumos, en usos térmicos y eléctricos, disgregándolos por aplicaciones finales.

Las necesidades o demandas energéticas del sector de la edificación se centran sobre todo en las aplicaciones para clima (refrigeración y calefacción), producción de agua caliente sanitaria y electricidad (iluminación y alimentación de diferentes equipos).

Se finaliza con una breve explicación de la posibilidad de reducir estas demandas energéticas con la implementación de tecnologías solares aplicadas a la edificación.

2.1 Consumo energético en edificios

A partir de la serie de datos históricos 1990-2013 del balance anual de consumos de energía final por sectores y fuentes energéticas de los consumos proporcionados por el IDAE [1], se puede observar que la evolución del consumo final de energía para usos energéticos en España ha ido aumentando con los años para poder satisfacer las necesidades de los diferentes sectores de consumo.

Los consumos energéticos se asocian a tres sectores principales: Industria, Transportes y Usos diversos. Y en este último sector se encontrarían los consumos derivados de la edificación, concretamente el sector residencial y el sector terciario (comercios, servicios, oficinas y administraciones públicas), ver Tabla 1.

En el Gráfico 1 se observa que la tendencia del consumo energético en los sectores Industriales y Transportes ha ido disminuyendo en los últimos años, seguramente debido a la crisis económica que empezó en el año 2008 y ha provocado una desaceleración en el crecimiento de la economía mundial y esto se ve reflejado en la disminución de la demanda de energía primaria y final de estos sectores.

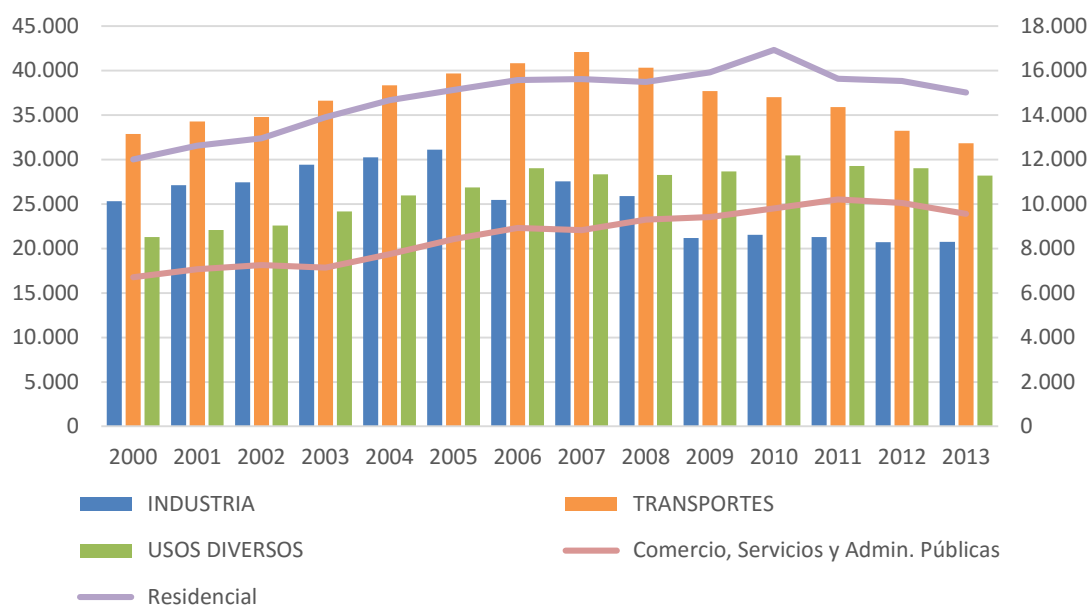
En cambio, la tendencia de la demanda y consumo energético en el sector de la edificación ha ido en aumento.

Tabla 1 Evolución del consumo final de energía (ktep¹) para usos energéticos en España.
Fuente: Elaboración propia con datos del IDAE 2000-2013

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
INDUSTRIA	25.331	27.132	27.457	29.434	30.266	31.103	25.482	27.539	25.909	21.177	21.528	21.289	20.703	20.750
Extractivas (no energéticas)	352	335	395	356	326	470	255	323	315	274	264	301	325	420
Alimentación,Beb.y Tabaco	2.561	2.761	3.110	3.109	3.076	2.882	2.220	2.275	2.199	2.140	2.209	1.824	2.069	2.169
Textil, Cuero y Calzado	1.207	1.004	1.035	1.004	1.001	984	633	547	489	514	435	420	393	346
Pasta, Papel e Impresión	2.093	1.913	2.180	2.667	2.292	2.489	2.185	2.403	2.176	1.928	1.430	1.665	1.856	2.052
Química	3.750	3.657	4.012	4.026	4.427	4.680	4.475	4.340	4.191	3.042	3.182	3.833	4.083	3.963
Minerales No Metálicos	6.368	7.046	6.194	7.367	6.870	7.527	6.615	6.732	6.265	4.469	4.540	4.637	3.762	3.383
Siderurgia y Fundición	3.934	4.566	4.437	4.654	5.087	4.596	3.778	3.850	3.764	2.610	3.074	3.169	2.902	3.034
Metalurgia no férrea	1.165	1.344	1.566	1.448	1.520	1.180	1.158	1.275	1.158	1.227	1.245	1.301	1.136	1.095
Transformados Metálicos	1.036	1.377	1.222	1.404	1.414	1.384	1.182	1.234	1.200	1.156	1.095	1.083	715	863
Equipo Transporte	928	946	893	1.043	1.029	835	660	761	733	559	467	520	446	384
Construcción	259	299	317	359	424	470	465	448	472	613	507	483	1.163	1.249
Resto Industria	1.679	1.882	2.095	1.996	2.800	3.606	1.857	3.351	2.947	2.646	3.082	2.053	1.851	1.792
Madera, Corcho y Muebles	599	626	663	700	864	789	664	731	692	521	507	549	493	507
Otras	1.080	1.256	1.432	1.296	1.936	2.817	1.193	2.620	2.255	2.125	2.575	1.504	1.358	1.285
TRANSPORTES	32.882	34.291	34.804	36.627	38.347	39.670	40.829	42.089	40.318	37.718	37.024	35.889	33.228	31.829
Carretera	26.134	27.441	28.167	29.529	30.613	31.602	32.559	33.732	32.181	30.429	29.626	28.383	25.261	25.238
Ferrocarril	709	772	790	863	952	1.031	846	988	981	862	900	731	782	482
Marítimo	1.397	1.391	1.398	1.564	1.620	1.558	1.691	1.467	1.329	1.102	1.059	828	861	505
Aéreo	4.496	4.537	4.307	4.516	5.005	5.333	5.578	5.869	5.794	5.281	5.396	5.753	5.425	5.144
Oleoductos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Otros no especificados	146	150	142	154	158	147	154	34	34	44	44	194	898	460
USOS DIVERSOS	21.298	22.099	22.602	24.176	25.959	26.857	29.019	28.358	28.283	28.664	30.455	29.272	29.033	28.206
Agricultura	2.578	2.403	2.367	2.947	3.345	3.115	2.815	2.947	2.699	2.363	2.243	2.404	2.677	2.694
Pesca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39	101
Comercio, Servicios y Admin. Públicas	6.713	7.062	7.258	7.145	7.749	8.419	8.930	8.822	9.300	9.409	9.801	10.206	10.043	9.564
Residencial	12.004	12.624	12.956	13.902	14.676	15.137	15.582	15.628	15.498	15.928	16.924	15.631	15.529	15.015
Otros no especificados	4	10	21	182	188	186	1.691	962	786	965	1.487	1.031	745	833
CONSUMO ENERGÍA FINAL	79.511	83.522	84.863	90.237	94.572	97.630	95.330	97.986	94.511	87.560	89.008	86.450	82.963	80.786

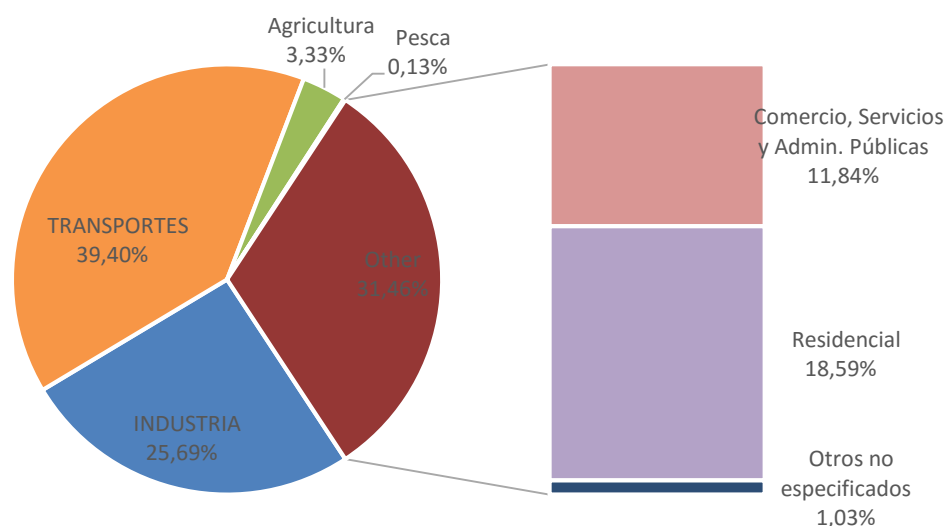
¹ Equivalencia 1 tep (tonelada equivalente de petroleo) = 11.630 kWh

Gráfico 1 Consumo final de energía (ktep) para usos energéticos en España. Fuente: Elaboración propia con datos del IDAE 2000-2013



Para el año 2013, último dato estadístico proporcionado por el IDAE, el mayor consumo de energía final recae en el sector del Transporte que representa el 39,40% del consumo total del país, en segundo lugar es el sector de Usos Diversos con un 34,92% y por último el sector de Industria con un 25,69% (ver Gráfico 2).

Gráfico 2 Consumo final de energía (ktep) en el 2003 en España. Fuente: Elaboración propia con datos del IDAE 2013

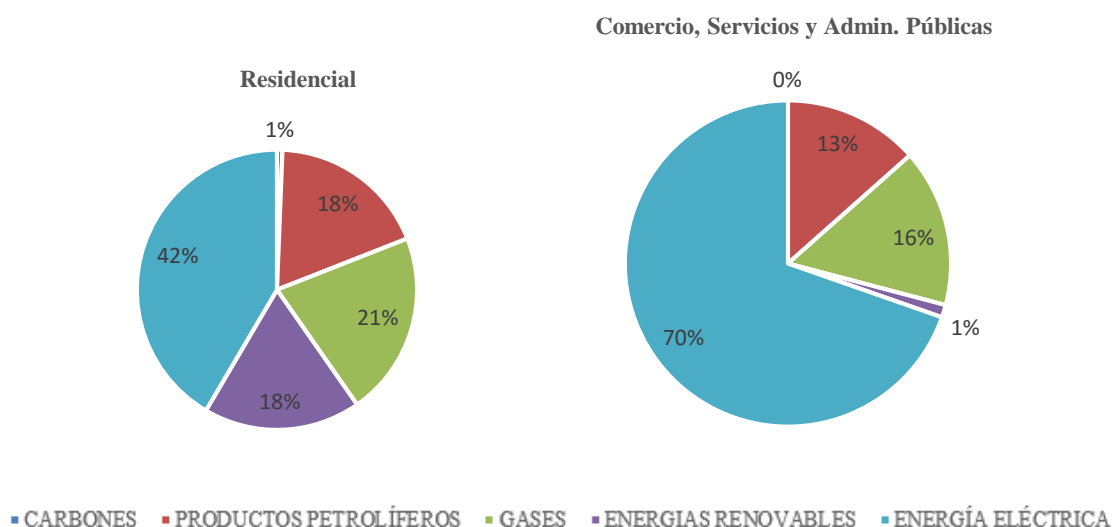


El sector de la edificación es un sector clave en el contexto energético actual, tanto nacional como comunitario, debido a la importancia que reviste sus demandas

energéticas, que representan el 30,43% del consumo total del país, y concretamente, el 18.59% para el sector residencial y el 11.84% para el sector comercio, servicios y administraciones públicas.

La demanda energética de un edificio es la energía que éste requiere para que en su interior, un usuario pueda disfrutar de unas determinadas condiciones de confort. Esta energía para usos térmicos y eléctricos, tales como la climatización (calefacción y refrigeración), la ventilación, la producción de agua caliente sanitaria y la iluminación, es abastecida mediante diferentes fuentes de energía, de las cuales las energías renovables representan sólo un 1% en el sector terciario y un 18% en el sector residencial (ver Gráfico 3). El uso de las fuentes de recursos renovables es pequeño si se compara con la demanda abastecida con energía eléctrica, que representa un 42% en el sector residencial y un 70% en el sector terciario. Por esta razón, las actuales políticas y estrategias energéticas y medioambientales, presentes y futuras, a nivel nacional y comunitario están puestas en el uso de fuentes de energía renovables para abastecer los consumos térmicos y eléctricos de los edificios y en la eficiencia energética en la edificación, diseñar sistemas con un consumo menor de energía.

Gráfico 3 Fuentes de energía para abastecer el consumo de energía final en el sector de la edificación. Fuente: Elaboración propia con datos del IDAE 2013



El sector terciario o servicios incluyen edificaciones con usos muy diversos, cuyos consumos energéticos responden a patrones muy distintos. A continuación se muestra el desglose de los diferentes usos de los edificios del sector terciario y su relación de energía final consumida por usos finales térmicos y eléctricos.

Tabla 2 Consumos finales por usos del consumo de energía final (ktep) en el sector de servicios. Fuente: Elaboración propia con datos del IDAE 2013

Uso del edificio o Rama	Energía final consumida (Ktep)	Consumo Total según Usos (ktep)	
		Térmicos	Eléctricos
Oficinas	3.321	713	2.608
Hospitales	518	137	381
Comercio	3.392	1.336	2.056
Restaurantes y Alojamientos	500	89	411
Educación	576	295	281
Otros Servicios	1.258	333	925
CONSUMO TOTAL SERVICIOS	9.564	2.570	5.737

Los consumos para cada tipología de edificio tienen una distribución del uso del consumo distinta en función del uso del edificio, para este estudio se han tomado los valores de referencia proporcionados por el Ministerio de Fomento [2], los cuales se pueden observar a continuación.

Tabla 3 Distribución en % del consumo en el sector terciario según la segmentación por usos realizada a partir de Catastro. Fuente: Ministerio de Fomento [2]

Distribución del consumo		Clima	Refrigeración*	Iluminación	ACS	Equipos
Oficinas (privadas)		55	25	20	5	20
Comercial	Pequeño comercio	40	20	20	5	15
	Centros comerciales	40		45		15
Hoteles		45		15	23	17
Centros deportivos		36	10	19	6	39
Hospitales		40		35	20	5
Administración pública		55	25	20	5	20
Colegios públicos		75		20		5
Institutos públicos		70		20		10
Universidades		40	10	30		30

*Refrigeración es una cantidad segregada de Clima y no debe considerarse en la suma de porcentajes

La distribución del consumo en el sector residencial se puede observar en la tabla siguiente.

Tabla 4 Consumos finales por usos del consumo de energía final (ktep) en el sector residencial. Fuente: Elaboración propia con datos del IDAE 2013

Distribución del consumo	Energía final consumida (Ktep)	Consumo Total según Usos (ktep)	
		Térmicos	Eléctricos
Calefacción	5.928	5.490	437
ACS	2.346	1.902	443
Cocina	1.016	465	552
Iluminación	697	--	697
Aire Acondicionado	141	2	139
Electrodomésticos	3.670	--	3.670
CONSUMO TOTAL HOGARES ²	13.798	7.860	5.938
CONSUMO TOTAL RESIDENCIAL ³	15.015	8.778	6.236

A partir de la Tabla 3 y Tabla 4 se observa que tanto en el sector terciario como en el sector residencial el mayor consumo de energía útil está destinado al clima, a los sistemas de calefacción y aire acondicionado. En el sector de los servicios la demanda de clima está abastecida mayoritariamente por usos eléctricos, en cambio en el sector residencial la demanda de calefacción es abastecida por usos térmicos y la demanda de frío por usos eléctricos.

La implementación de la energía solar para abastecer las necesidades energéticas en los edificios significaría una reducción en el consumo energético y un ahorro en las emisiones de gases de efecto invernadero. En este camino se encuentran las directrices comunitarias en materia de eficiencia energética y cambio climático, la Directiva 2006/32/CE de Servicios Energéticos, la Directiva 2002/91/CE sobre Eficiencia Energética de los Edificios y su refundición en la Directiva 2010/31/UE, el Plan de Acción UE de la Eficiencia Energética, y el paquete legislativo comunitario de Energía y Cambio Climático. Estas políticas coinciden en destacar el papel de la eficiencia energética, estimándose en el horizonte del 2020, un potencial de ahorro energético del 27% en el conjunto de edificios del sector residencial de la UE [3].

² El consumo por usos ha sido estimado en base a la metodología del Estudio SECH-SPAHOUSEC. Los datos se refieren al consumo de los hogares asociado a las viviendas principales.

³ Resultados Balances MINETUR/IDAE para el sector residencial. La diferencia entre el consumo del sector residencial y el de los hogares obedece a que en el primer caso se incluye el consumo energético de las segundas residencias, así como el de zonas comunes de edificios dedicados a viviendas y urbanizaciones, mientras que en el segundo caso, la estimación se realiza únicamente para las viviendas principales.

Tabla 5 Estimates for full energy saving potential in the end-use sectors. Fuente: [3]

Sector	Energy consumption (Mtoe) 2005 (EE scenario)	Energy consumption (Mtoe) 2020 (BAU scenario)	Energy Saving Potential 2020 (%)
Households (Residential)	280	338	27%
Commercial buildings (Tertiary)	157	211	30%
Transport	332	405	26%
Manufacturing Industry	297	382	25%

2.2 Uso de la energía solar

En la política actual existe una gran preocupación por el ahorro energético para conseguir una menor dependencia de la energía convencional. La integración de sistemas de energía solar en la edificación, es una importante estrategia para soluciones energéticas sostenibles. La concepción de edificios no está condicionada sólo por los costes iniciales de la construcción, también se debe tener en cuenta los costes de operación, donde los componentes energéticos asumen una importancia creciente.

La Tierra recibe del Sol una gran cantidad de energía de la que sólo se consume una mínima parte. España tiene una privilegiada situación geográfica y climatología para el aprovechamiento de la energía solar si se compara con el resto de los países europeos (ver tabla excel). La radiación solar global sobre superficie horizontal en España oscila entre valores altos de radiación (superiores a $1600 \text{ kWh/m}^2/\text{año} \cong 4.400 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$), en zonas del sur-centro de España, además de las Islas Canarias, y valores bajos de radiación (inferiores a $1400 \text{ kWh/m}^2/\text{año} \cong 3.800 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$), en la costa norte de España [4][5].

La forma de aprovechamiento de la energía solar de los edificios puede ser mediante elementos mecánicos (forma activa), o sin la mediación de estos elementos mecánicos (forma pasiva). Dentro de los sistemas activos se encuentran los captadores solares térmicos que convierten la energía de la radiación solar en energía térmica, formando parte de los sistemas de aprovechamiento térmicos de los edificios como elementos renovables. Los sistemas pasivos son los que utilizan los propios elementos y materiales de construcción para obtener el mayor aprovechamiento de la energía solar. Estos sistemas no están contemplados como elementos renovables, pero su uso ayudará en gran medida a fomentar la eficiencia energética en la edificación, reduciendo el consumo energético dentro de los edificios sin disminuir el confort térmico.

El confort térmico está definido, mediante la norma ISO 7730, según CIEMAT (1999, p.3.5), como “aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico”. A efectos prácticos se dice que se alcanza un estado de confort térmico cuando el balance energético establecido entre el cuerpo humano y las condiciones exteriores que lo rodean sea nulo, a estas condiciones se les suele denominar neutralidad térmica [Ciemat, 2001, p.3.6]. Por tanto, esta neutralidad térmica hace que las personas, en general, no sientan ni calor ni frío.

En el apartado anterior se han identificado los consumos de energía final del sector de la edificación, su tendencia al alza y sus usos de consumo, disgregándolos por aplicaciones o sus usos de consumo, en la tabla siguiente se resume el tipo de energía final requerida para cada aplicación.

Tabla 6 Distribución del uso del consumo final de energía en el sector de la edificación.

Fuente: Elaboración propia

Uso energía final	Uso de la energía útil	Equipamiento
Uso térmico	Producción de ACS	Caldera de gas
	Calefacción	Caldera + radiadores o suelo radiante
Uso eléctrico	Producción de ACS	Termo eléctrico
	Clima: Calefacción y Refrigeración	Enfriadora Equipos individuales de expansión directa por condensación al exterior (splits)
	Iluminación	Instalación eléctrica
	Equipos	Instalación eléctrica

3 TECNOLOGÍAS SOLARES EN LA EDIFICACIÓN

En este capítulo se presentan los sistemas o tecnologías solares que se pueden aplicar en la edificación para reducir la demanda energética y la dependencia a los combustibles convencionales. Las tecnologías solares aplicables a la edificación se han clasificado en dos grandes grupos: sistemas solares activos y sistemas solares pasivos. Los sistemas solares pasivos se podrían englobar en la especialidad de Arquitectura Bioclimática, por lo tanto, sólo se realizará un estudio básico de ellos debido a que este documento se ha centrado en estudiar los sistemas solares activos. Por último se han expuesto unos ejemplos prácticos de edificaciones bioclimáticas implementadas en el proyecto ARFRISOL, edificios de nueva construcción donde se han incorporado diferentes combinaciones de sistemas solares, tanto pasivos como activos para tener un consumo energético cero o casi nulo.

3.1 Tecnologías solares pasivas

Uno de los objetivos en la edificación es proteger al ser humano de las condiciones atmosféricas extremas. Las estrategias pasivas ayudan a atenuar las oscilaciones de temperatura en el interior del edificio durante todo el año, independientemente de las notables variaciones de la temperatura exterior, de forma que se reduzca el consumo energético generado por equipos de acondicionamiento y reduciendo la necesidad de iluminación artificial mediante adecuados diseños de los huecos (puertas, ventanas...).

La energía solar pasiva utiliza componentes que forman parte constituyente del edificio, ya sea como elementos básicos (muros ventanas, cubiertas, etc.) o como elementos modificados para tal fin (invernaderos adosados, galerías, chimeneas solares, etc.) de forma que la edificación se convierte en el sistema de captación solar.

La energía solar activa aprovecha los recursos solares a partir de mecanismos básicos de transferencia de calor (convección, conducción y radiación) que combinados dan lugar a una transferencia neta de calor hacia un receptáculo, aprovechando dicha energía acumulada o directa para un fin particular.

Los diseños de calefacción solar intentan atrapar y almacenar la energía térmica de la luz solar directa. El enfriamiento pasivo minimiza los efectos de la radiación solar a través de sombreado o la generación de corrientes de convección de aire de ventilación.

Un aspecto importante en el diseño de edificios para el aprovechamiento de la energía solar pasiva está en saber gestionar el flujo de corrientes de aire dentro el edificio para capturar el calor en invierno y disiparlo al exterior en verano.

Las estrategias pasivas incluyen la iluminación natural, la calefacción pasiva, refrigeración pasiva y ventilación natural. Tanto la calefacción como la refrigeración pueden captar o ceder energía, respectivamente, de forma directa, indirecta o aislada.

a) Sistemas de captación directa

Permiten el aprovechamiento energético directo de la radiación solar a través de elementos huecos transparentes de las fachadas como ventanas, ventanales, claraboyas, lucernarios y demás elementos translúcidos.

La eficiencia energética asociada a la utilización de la ganancia directa a través de huecos acristalados como estrategia de acondicionamiento térmico está directamente relacionada con los siguientes factores:

- Características del hueco: orientación adecuada para el aprovechamiento de la radiación solar; dimensiones; forma y posición
- Características energéticas del vidrio: dentro del mercado existente, hay diversas opciones de selección de vidrios con diferentes ajustes en sus mecanismos de transferencia energética.
- Características de las carpinterías: algunos de los factores más determinantes en la elección de materiales para carpinterías que potencien su eficiencia energética son: conductividad térmica, valor U de perfil tipo, grado de estanqueidad, resistencia a agentes atmosféricos, mantenimiento, coste energético de su ciclo de vida, ciclo de vida útil, reciclabilidad, obstrucción visual generada por sus secciones, etc...
- Incorporación de elementos de sombreadamiento que limiten la ganancia directa durante el periodo sobrecalentado.
- Incorporación de elementos de aislamiento que limitan las pérdidas térmicas en periodos invernales.

La captación directa se limita a la disposición de suficiente superficie acristalada correctamente orientada. La orientación sur es la más favorable para el acristalamiento (mayores ganancias en invierno que en verano), siendo las orientaciones este y oeste las más desfavorables (mayores valores en verano).

Para solucionar los problemas de la captación simple, se han desarrollado nuevos sistemas que mejoran el rendimiento, acumulando la energía que ha atravesado el vidrio y distribuyéndola adecuadamente en el espacio y tiempo.

Algunos ejemplos de sistemas pasivos de captación directa son: Ventanas y ventanales, Claraboyas, Atrio acristalado y Patio acristalado, etc...

b) Sistemas de captación diferida mixta o indirecta

En estos sistemas existe un periodo prolongado entre el momento en el que se recibe la energía y el momento en que ésta se aprovecha como consecuencia de una acumulación previa.

Se caracterizan por la potenciación de estrategias de aprovechamiento energético de la radiación solar en un espacio intermedio entre el exterior y el espacio que se desea acondicionar. Este espacio tiene una gran entrada de radiación directa a través de superficies acristaladas, tanto horizontales como verticales. Desde dicho espacio intermedio, el calor se transmite al espacio a acondicionar por diferentes mecanismos: radiación a través de elementos de masa térmica, convección (lazos convectivos) a través de aberturas de regulación, o bien mediante una combinación de ambos sistemas.

A continuación se indican algunos ejemplos de sistemas de captación solar indirectos o diferidos mixtos:

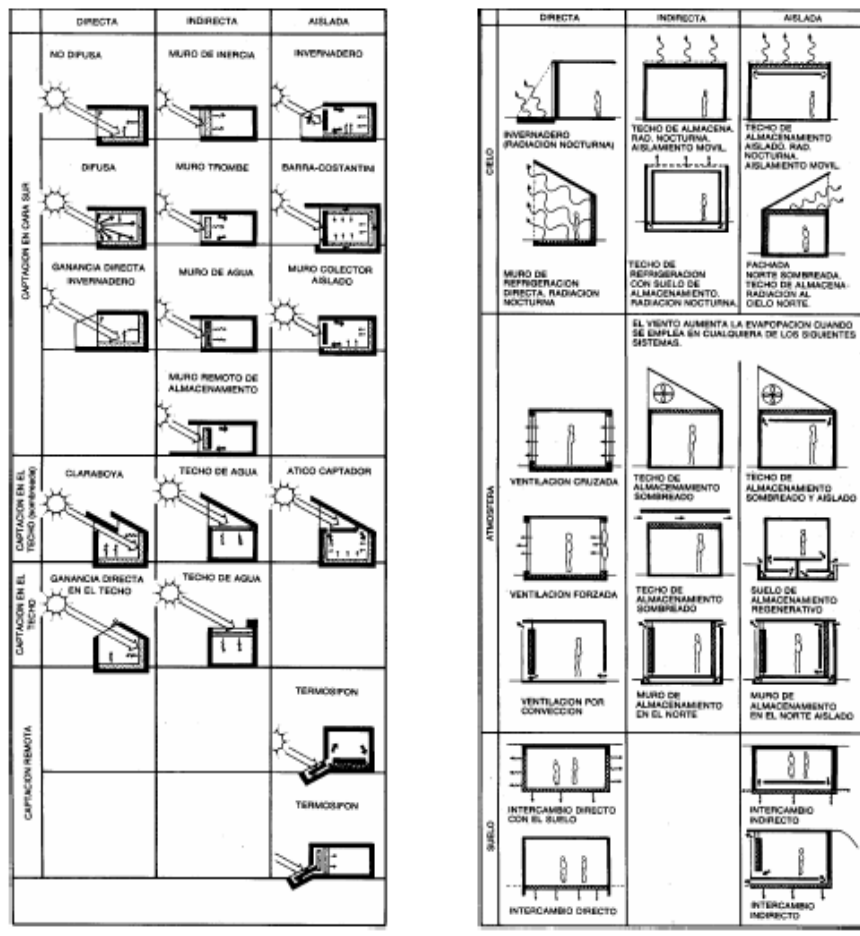
- *Invernaderos o galerías acristaladas:* Galería acristalada, separada de las estancias interiores por un muro másico de color oscuro. La radiación recibida incrementa la temperatura en esta galería, acumulándose en el muro másico y penetrando en los espacios interiores con el retraso correspondiente.
- *Muros de inercia:* Consisten en un muro macizo orientado al sur, de piedra, hormigón, ladrillo macizo, etc., de un espesor entre 25 y 40 cm, con la superficie exterior oscura y protegido con un vidrio, para aprovechar las ventajas del efecto invernadero, situado a unos pocos cm de ésta. Durante el día, la radiación solar incidente produce el calentamiento del muro, que acumula el calor y lo cede, por radiación, al interior con un retardo de 12 horas (por la noche). En verano para evitar el sobrecalentamiento, conviene protegerlo de la radiación o disponer de aberturas para poder ventilar el muro. Algunas variantes de este tipo de muros son los muros Trombe y muros de agua.

c) Sistemas de captación aislada o remota

Espacios, invernaderos o colectores solares de aire no adosados a la edificación cuando en ésta no se producen las condiciones adecuadas para la ganancia solar. Están conectados con el espacio a acondicionar exclusivamente mediante conductos de aire y son de carácter híbrido ya que requieren un sistema de impulsión del aire.

En la figura 1 se puede ver la clasificación de los elementos solares de calefacción (Fig.1a) y refrigeración (Fig.1b), para captación directa, indirecta y aislada. En los elementos de calefacción directa se puede ver que el almacenamiento térmico está en el interior de la casa y puede localizarse sobre el suelo o muro interior. En la calefacción indirecta los mecanismos de transmisión son mediante la conducción a través de los muros y la convección del aire por el calentamiento producido entre el vidrio y el muro. En la calefacción aislada los flujos se obtienen por convección de aire libre o forzado (ventiladores) [6]

Figura 1 Clasificación de los elementos solares pasivos: a) calefacción y b) refrigeración.
Fuente: [6]



En esta clasificación, los sistemas solares térmicos de termosifón están considerados sistemas solares pasivos ya que no utilizan ningún elemento mecánico (bomba de recirculación) para su funcionamiento, debido a que el movimiento de los fluidos es producido por convección natural por diferencia de densidades y temperaturas.

Un buen diseño arquitectónico también nos permite mejorar la iluminación natural. Un edificio comercial puede reducir su factura de electricidad mediante el uso de la luz natural. Se crea un ambiente agradable y se reduce los costos de aire acondicionado, ya que hay que considerar que el calor generado por las bombillas y las fuentes de iluminación artificial incrementa la temperatura de los espacios a climatizar.

Para el diseño y aplicación de los recursos y elementos de captación solar pasivos se tiene que tener en cuenta la ubicación final del edificio (condiciones climáticas y micro-climáticas) y las orientaciones de sus fachadas. Estos elementos de captación solar pasiva se deberían concentrar sobre todo en la orientación sur de los edificios, ya que dicha orientación es la que recibe más radiación solar a lo largo del año en el hemisferio norte.

La captación solar directa permite a la radiación solar incidir directamente en el espacio que se quiere calentar. Dentro del diseño solar pasivo, los sistemas de acristalamiento juegan un papel decisivo en el balance energético del edificio. Su orientación, dimensiones y propiedades físicas deben ser evaluadas para garantizar su operatividad a lo largo de los diferentes ciclos estacionales y diarios. Para una optimización del área de huecos se pueden emplear programas de diseño energético de edificios.

Algunos ejemplo de sistemas indirectos de captación solar serían:

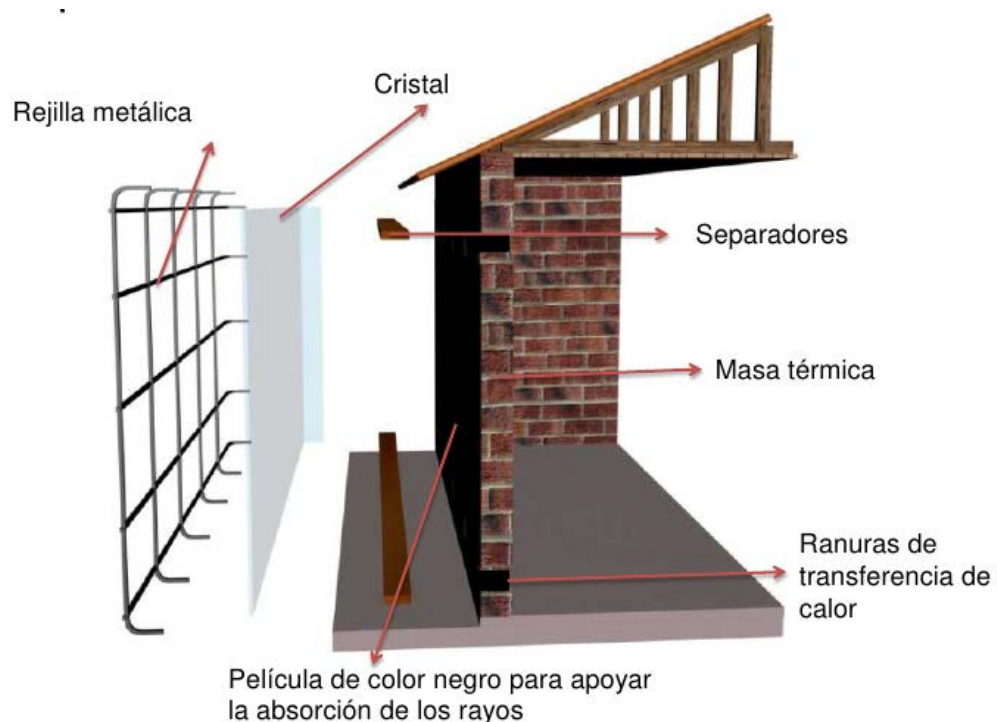
- *Los invernaderos:* Estos consisten en una galería acristalada, separada de las estancias interiores por un muro másico de color oscuro. La radiación recibida incrementa su temperatura interior acumulándose en el muro másico y penetrando en los espacios interiores.

Algunos de los criterios de diseño que se deben tener en cuenta para este tipo de sistema son:

- Se colocarán entre 0,1 y 0,5 m² de acristalamiento por cada m² de superficie a calefactar, habiendo además entre 0,6 y 1,6 m² de superficie acristalada por cada m² de suelo del invernadero.

- La superficie del muro másico presenta un color oscuro y una textura rugosa para facilitar la captación de la radiación solar.
 - El muro másico presenta un espesor entre 20 y 25 cm.
 - Se deben diseñar protecciones solares para este tipo de sistemas (al igual que los muros Trombe).
- *Muro Trombe:* Consiste en un muro másico colocado detrás de un vidrio transparente, de modo que se produce un efecto invernadero en el estrecho espacio entre ambos. Es una variante del muro de inercia en la que se dispone de unas rejillas o aberturas regulables situadas en la parte inferior y superior que permiten la circulación del aire caliente desde la cámara (espacio entre la superficie exterior del muro y el vidrio) hacia el interior del edificio.

Figura 2 Despiece de un ejemplo de muro Trombe. Fuente: <http://es.slideshare.net/cfloresd/muro-trombe-3694723>

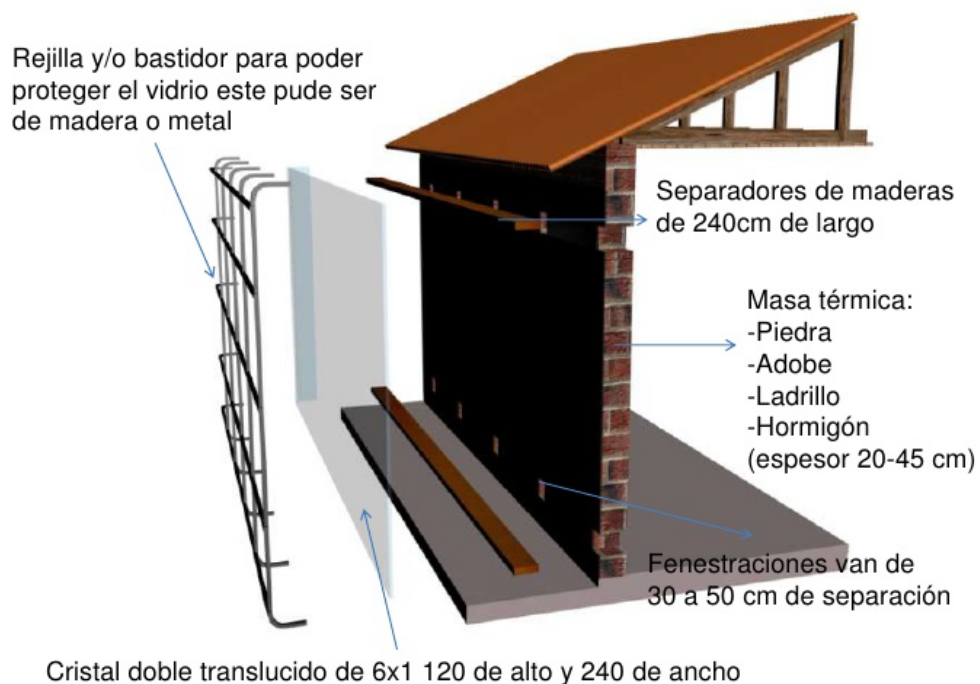


Los muros Trombe cumplen con tres funciones: la captación directa de la radiación solar a través del vidrio, su acumulación en el muro y la distribución del aire caliente generado con esa energía a través de los huecos dispuestos en el muro.

A continuación se exponen brevemente algunos de los aspectos a tener en cuenta para el diseño de este tipo de muros:

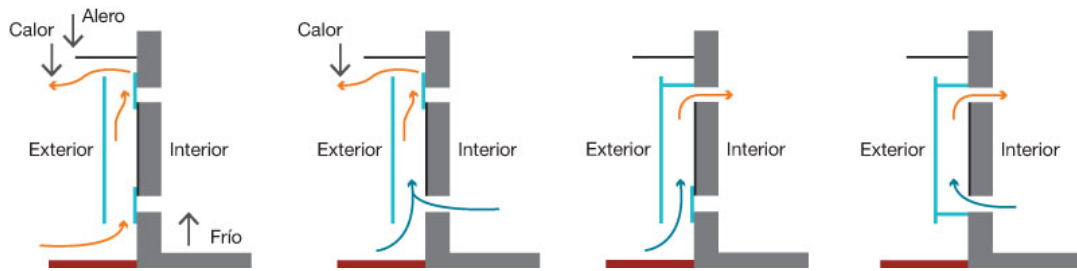
- Se colocarán aproximadamente entre 0,3 y 0,8 m² de muro por cada m² de superficie interior a calefactar.
- La superficie del muro másico debe presentar un color oscuro y una textura rugosa para facilitar la captación de la radiación solar y evitar las pérdidas por reflexión.
- El cálculo del espesor del muro se tiene que hacer con mucha precisión para ajustar el desfase de la onda térmica. El espesor de la cámara de aire deber ser de unos 10 cm.
- Se deben diseñar protecciones solares para estos muros.

Figura 3 Materiales de construcción y utilización de un ejemplo de muro Trombe.
Fuente: <http://es.slideshare.net/cfloresd/muro-trombe-3694723>



La temperatura de trabajo oscila entre 50 y 70°C. Esto puede producir problemas de sobrecalentamiento en verano, por lo que se le debe dotar de las protecciones solares adecuadas de forma que no estén soleadas en verano. Como inconveniente a la hora de aplicar este sistema en un edificio es que se trata de un muro pesado y con un color oscuro que puede no ser aceptado estéticamente.

Figura 4 Protección solar (alero) pra un miuro Trombe. Fuente: <http://eliseosebastian.com/que-es-un-muro-trombe/>



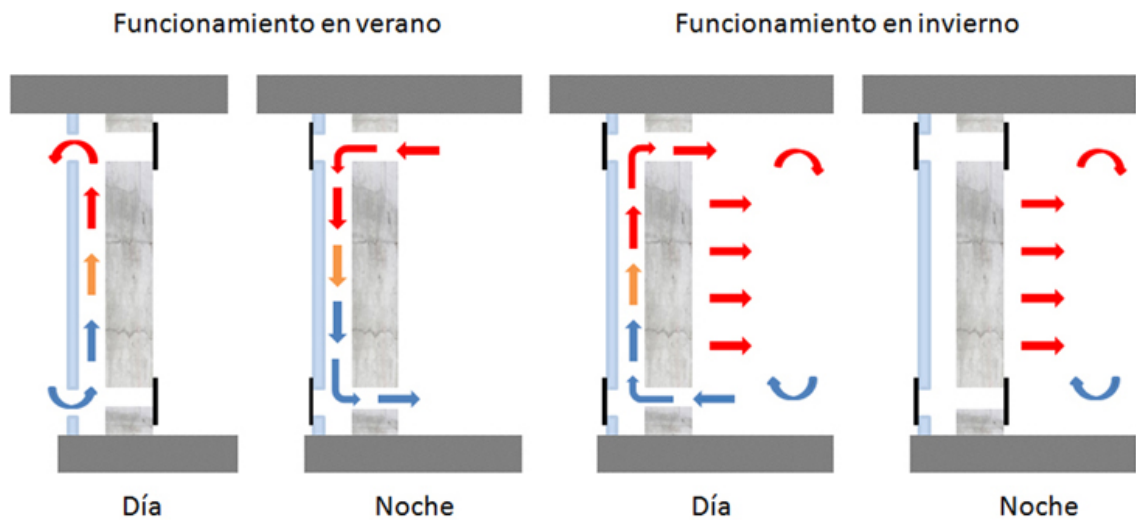
En invierno, se combina la distribución radiante desde el elemento de masa con lazos convectivos:

- Durante el día el aire frío del interior de la edificación es absorbido por el espacio de colección solar a través de las rejillas inferiores, calentándose en éste, y es devuelto tras su calentamiento por radiación y convección al espacio interior a través de rejillas superiores. El elemento de masa que actúa como acumulador térmico sigue calentándose durante el ciclo diurno y actúa asimismo como elemento de radiación al interior.
- Durante la noche se interrumpe el lazo convectivo mediante el cierre de las trampillas y se aprovechan las características inerciales del elemento de masa, que actúa como elemento de radiación al interior.

En verano, en función de su dimensionado, el muro Trombe actúa como elemento de modulación de masa o como elemento de ventilación del espacio a acondicionar:

- Durante el día, se limita la ganancia a través del sistema mediante la obstrucción solar y se limita el calentamiento del elemento de masa mediante su ventilación desde el exterior sombreado y el cierre de los elementos de conexión con el espacio a acondicionar.
- Durante la noche se posibilita la ventilación del espacio y el enfriamiento del elemento de masa mediante la apertura de todas las trampillas del sistema.

Figura 5 Funcionamiento de un muro Trombe en verano y en invierno. Fuente: <http://www.emedperu.org/muro-trombe/>



Los sistemas directos de captación solar son la forma más elemental y la más eficaz de captación de energía solar; no es necesario ningún elemento extra a la edificación, sólo es preciso un correcto diseño. Sin embargo estos sistemas tienen varios inconvenientes como son la posibilidad de deslumbramiento interior, pueden ser perjudiciales para el bienestar en el verano y dependen de las horas de sol provocando una irregular distribución del calor a lo largo del día.

La ventaja energética de los sistemas indirectos de captación solar con respecto a los sistemas de captación directa es que permite generar temperaturas muy superiores a las de confort en el espacio intermedio, aprovechando al máximo la energía procedente del sol sin comprometer por ello las condiciones de confort en los espacios adyacentes a las que se realizará la cesión energética diferida.

La energía solar pasiva se caracteriza por su bajo coste para la realización de su trabajo. A veces, este coste es incluso nulo. El coste de mantenimiento es muy reducido. Durante su funcionamiento no se emiten gases de efecto invernadero. A pesar de ello, se continúa trabajando para una mejor optimización del rendimiento y beneficio económico.

Las tecnologías solares pasivas ofrecen importantes ahorros, sobre todo en lo que respecta a la calefacción de espacios (ver Tabla 7). Combinadas con tecnologías solares activas, como la energía solar fotovoltaica, pueden provocar que los edificios tengan un consumo cero de energía.

Tabla 7 Aplciaciones de los sistemas solares pasivos en edificios

Transformación	Clasificación	Equipo	Aplicaciones
Conversión térmica	Directos	Huecos: - Ventanas - Lucernarios - Atrios	Iluminación natural Climatización espacios
	Indirectos	Invernaderos Muros inercia: - Muros Trombe - Muros de agua	Climatización de espacios
	Aislados o Remotos	Muros de inercia + ventiladores/compuestas Termosifón	Climatización de espacios Producción de ACS

3.2 Tecnologías solares activas

Los sistemas solares activos que se pueden implementar en el sector de la edificación para abastecer su demanda energética se clasifican en dos grandes grupos, en base de como transforman la energía del Sol, los térmicos y los fotovoltaicos. Estos sistemas suelen utilizarse como apoyo a los sistemas convencionales para la producción de ACS (Agua caliente Sanitaria), climatización y electricidad.

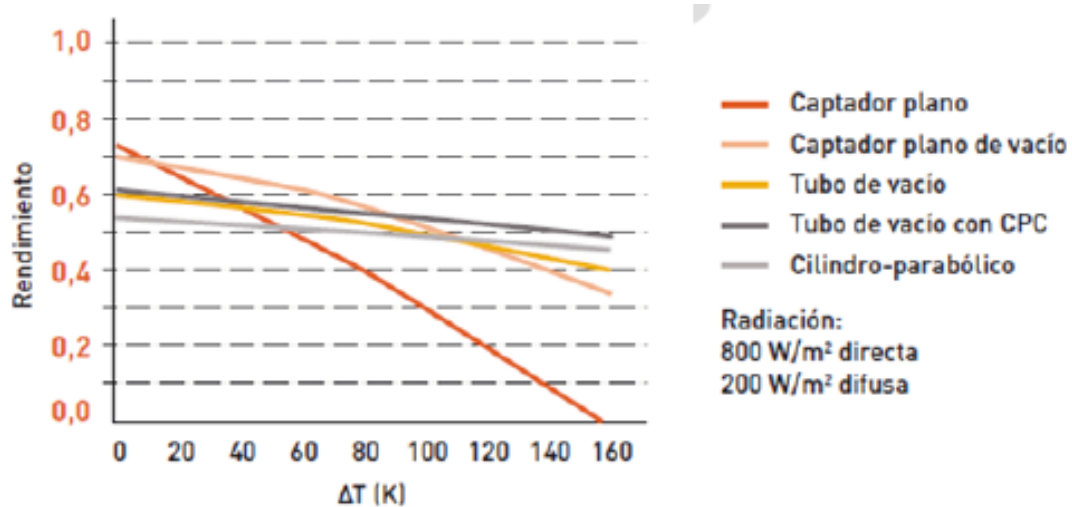
Sistemas solares térmicos

El aprovechamiento de la energía solar térmica consiste básicamente en transformar la energía luminica del Sol en energía térmica mediante la transferencia de calor por convección, conducción y radiación que se produce en el captador solar, dicha energía térmica se obtiene elevando la temperatura de un fluido, la cual se almacena para su posterior utilización.

Los **sistemas solares térmicos** en función de la temperatura de trabajo del fluido caloportador se clasifican en sistemas de baja, media y alta temperatura. A continuación se realiza una breve descripción de las principales características técnicas de las diferentes tecnologías de captación solar disponibles en base a esta clasificación.

Tal como se observa en la Figura 6 el rendimiento de los captadores solares disminuye a medida que la temperatura del fluido caloportador aumenta y la temperatura ambiente o la radiación disponible disminuyen.

Figura 6 Rendimiento instantáneo de diferentes tipos de colectores. Fuente: [7]



Tecnologías de baja temperatura

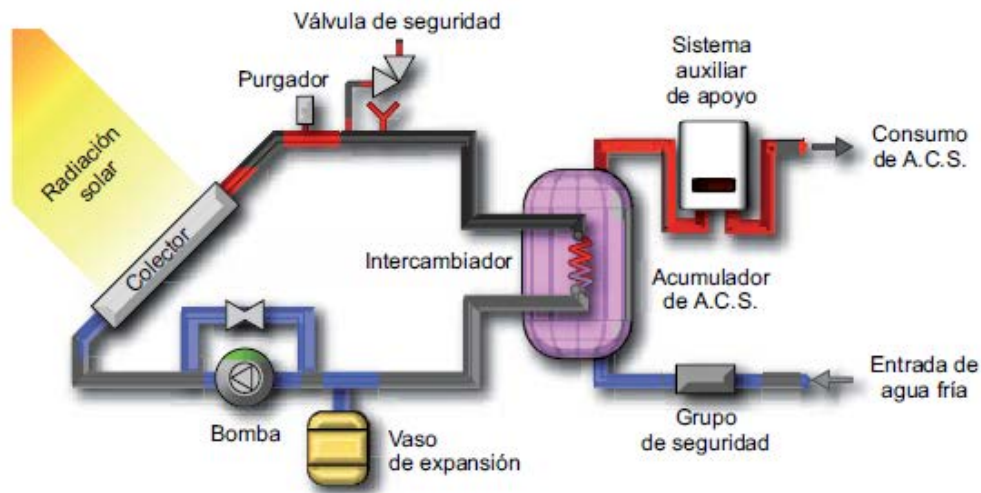
Las tecnologías solares de baja temperatura, la temperatura de trabajo del fluido caloportador oscila entre los 60 y los 90°C. Este tipo de captadores aprovechan tanto la radiación directa como la difusa y no es necesario que sigan el movimiento del sol, es decir pueden ser estacionarios.

Los subsistemas empleados en esta tecnología dependen del tipo de instalación, pero en general los subsistemas básicos serían:

- 1) Subsistema de Captación
Formado por los captadores solares, fluido caloportador, el circuito hidráulico y el sistema de circulación
- 2) Subsistema de acumulación
- 3) Subsistmea de conversión de energía
Sistemas de intercambio, como intercambiadores de placas fluido/fluido, el circuito hidráulico y el sistema de circulación
- 4) Subsistemas de gestión y control
Sistema encargado de gestionar los diferentes subsistemas para garantizar la correcta operación.
- 5) Subsistema convencional de apoyo

Entre las utilizaciones más extendidas basadas en esta fuente de energía de baja temperatura figuran la producción de agua caliente sanitaria, la calefacción por radiadores o suelo radiante y la climatización de piscinas.

Figura 7 Esquema conceptual de un sistema captador solar térmico de baja temperatura.
Fuente: [8]



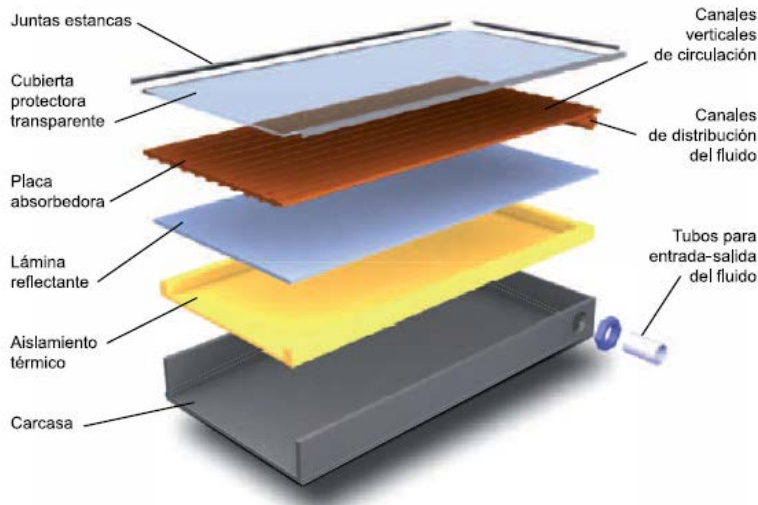
Los tipos de captadores solares de baja temperatura que se encuentran en el mercado serían:

- Sin cerramiento o cubierta de vidrio, cuyo uso no cumple con las especificaciones del CTE para las instalaciones destinadas exclusivamente a la producción de agua caliente sanitaria. Estos captadores se utilizan para la climatización de piscinas que requieren temperaturas máximas de 30°C y para sistemas solares pasivos híbridos (cubiertas de pizarra, techos solares para reducir la incidencia solar a la demanda de frío del edificio, etc...).
- Con cerramiento o cubierta de vidrio, del tipo:
 - Planos
 - De vacío

El captador solar plano está compuesto por los siguientes elementos:

- Carcasa, que contiene al conjunto.
- Aislamiento posterior y lateral de la caja, que reduce las pérdidas de calor.
- Lámina reflectante.
- Cubierta transparente situada en la cara frontal del captador
- Placa absorbidora metálica, encargado de transformar la radiación solar en energía térmica y transmitirla al fluido caloportador.
- Canales de distribución, serpentín que conduce el fluido caloportador.
- Canales verticales de circulación
- Conexiones hidráulicas de ida y retorno

Figura 8 Partes de un captador plano. Fuente: [8]



Todos los captadores solares, independientemente de su clasificación y la temperatura de trabajo del fluido, el fabricante debe proporcionar su curva de rendimiento realizada por laboratorios homologados. En estos ensayos de laboratorio se aprecian pequeñas diferencias del comportamiento de los captadores respecto a la ecuación lineal del rendimiento. Por ello la norma UNE-EN 12975-2:2001 indica que se deberá realizar la representación gráfica del rendimiento (η) mediante ajuste estadístico de curvas, usando el método de mínimos cuadrados para obtener la curva de eficiencia instantánea de la forma:

$$\mu_{th} = \mu_0 - a_1 \frac{(T_m - T_a)}{G_{DNI}} - a_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{G_{DNI}} \quad (1)$$

$$E_{Th} = \rho_{th} A_c G_{DNI} \quad (2)$$

Donde:

T_m : temperatura media del fluido en el colector (°C)

T_a : temperatura ambiente (°C)

G_{DNI} : irradiación solar hemisférica (W/m²)

La curva resultante es de segundo orden, en base a un valor de G de 800 W/m², como resultado de la regresión de mínimos cuadrados, aunque, al ser el término a_2 muy pequeño se aproxima visiblemente a una recta.

Como el método f-Chart emplea un único coeficiente global de pérdidas, el Pliego de Condiciones Técnicas IDAE, publicado en enero de 2009, propone la siguiente expresión, aplicable a los datos resultantes de realizar los ensayos de acuerdo con la norma UNE-EN 12975:

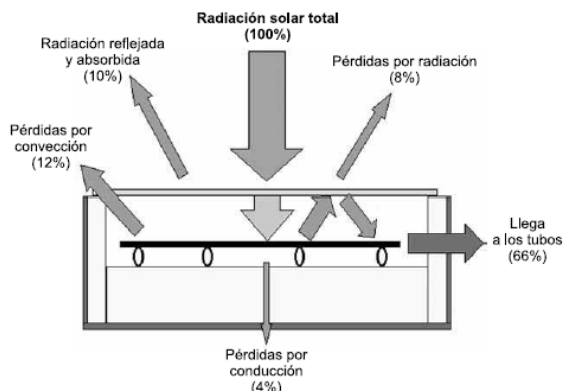
$$FR U_c = a_1 + 30 a_2 \quad (3)$$

Algunos fabricantes proporcionan directamente este coeficiente global de pérdidas U_c .

El principio físico de funcionamiento de un captador solar plano se basa en el efecto invernadero, cuyo proceso se puede resumir de la forma siguiente:

- La radiación solar incide sobre la cubierta transparente, que cómo se ha expuesto anteriormente es transparente a la radiación de longitud de onda inferior a $3 \mu\text{m}$, que atraviesa la superficie de captación e incide sobre la superficie de absorción.
- Entre la cubierta transparente y la superficie de absorción, existe una cámara de aire, cuya finalidad es disminuir las pérdidas por convección de la superficie absorbedora.
- Los tubos por los que circula el fluido caloportador se encuentran unidos a la superficie absorbedora, ya sean soldados o extrusionados en la misma superficie. Debido a la incidencia de la radiación solar, la superficie absorbedora se calienta, y la energía se transfiere al fluido por conducción.
- Las pérdidas radiantes emitidas por el absorbedor, se ven reducidas por la baja transmisividad de las cubiertas para radiaciones de longitudes de onda superiores a las $3 \mu\text{m}$, ya que proceden de la radiación incidente que ha aumentando su longitud de onda tras el choque.
- Para disminuir las pérdidas por conducción por la parte de atrás de la superficie absorbedora, se coloca un aislamiento térmico.

Figura 9 Eficiencia de la captación solar en un captador plano. Fuente: [8]



El procedimiento en el que se basan estos sistemas de captación solar es muy simple, pero a la vez de gran utilidad para el hombre por los servicios que ofrece en multitud de aplicaciones.

Las instalaciones solares térmicas también se pueden clasificar en función de su principio de circulación:

- Las instalaciones solares térmicas de circulación forzada van equipadas con dispositivos (bombas) que provocan la circulación forzada del fluido de trabajo. Permiten integrar bien los captadores en la cubierta de los edificios, así como poner el acumulador en el interior de la vivienda. Pueden ser de circuito cerrado y aporte indirecto o de circuito abierto y aporte directo, solo válidas en determinadas circunstancias de calidad del agua y sin riesgo de heladas.
- En las instalaciones solares térmicas de circulación natural (termosifón), el fluido de trabajo circula por convección natural. Tiene menos elementos y es más barata que las de circulación forzada. El acumulador dificulta la integración en la cubierta de los edificios. Puede ser de circuito cerrado y aporte indirecto o de circuito abierto y aporte directo, solo válida en determinadas circunstancias de calidad del agua y sin riesgo de heladas. Estos sistemas se consideran sistemas solares pasivos.

Tecnologías de media temperatura

La tecnología de media temperatura va destinada a aquellas aplicaciones que requieren temperaturas más elevadas de trabajo. A partir de los 80 °C los captadores planos convencionales presentan rendimientos más bajos [9] y cuando se pretende alcanzar temperaturas de trabajo entre 100 °C y 400 °C debe acudirse a otro tipo de elementos de captación.

Para llegar a estos niveles de temperatura resulta indispensable utilizar sistemas que concentren la radiación solar mediante lentes o espejos parabólicos. Los más desarrollados en la actualidad son los captadores cilindro-parabólicos, que se valen de espejos para calentar un fluido hasta producir el vapor que nos permita mover una turbina. De esta forma, la energía térmica se convierte en energía mecánica.

En este tipo de instalaciones el fluido que se utiliza, principalmente, es vapor de agua, aceite o soluciones salinas porque nos permite trabajar a temperaturas más elevadas. Además, estos sistemas de concentración requieren un seguimiento continuo del Sol, ya que sólo aprovechan la radiación directa.

Por ello, en las tecnologías de media temperatura son muy comunes los equipos de seguimiento en un solo eje, Norte-Sur o Este-Oeste. También existen ejemplos con seguimiento en todas las direcciones, aunque los mecanismos correspondientes se complican en exceso, por lo que no suele ser una solución demasiado adecuada para este tipo de sistemas.

Los subsistemas empleados en esta tecnología dependen del tipo de instalación, pero en general los subsistemas básicos serían:

- 1) Subsistema de Captación
Consiste en los captadores solares y circuito hidráulico
- 2) Subsistema de intercambiador de tanques de aceite
- 3) Subsistema de evaporación de gases
- 4) Subsistema de aplicación o conversión de energía
Consiste en los sistemas donde se transforma la energía solar en energía térmica (intercambiadores fluido/fluido) o en energía mecánica. Además de todos los elementos hidráulicos para su correcta operación.
- 5) Subsistemas de gestión y control
- 6) Subsistema convencional de apoyo

La tecnología solar térmica de media temperatura suele tener dos aplicaciones distintas:

- La **producción de calor** en procesos industriales, desalinización o en climatización solar. Por ejemplo, vapor a temperaturas superiores a los 150 °C.
- La **generación de electricidad** mediante la conexión del fluido caliente (hasta 400 °C) utilizado por los colectores a un sistema convencional de producción de electricidad a partir de un ciclo térmico (Rankine).

Los tipos de captadores solares de concentración que se emplean para media temperatura serían:

- Captadores cilindro-parabólicos

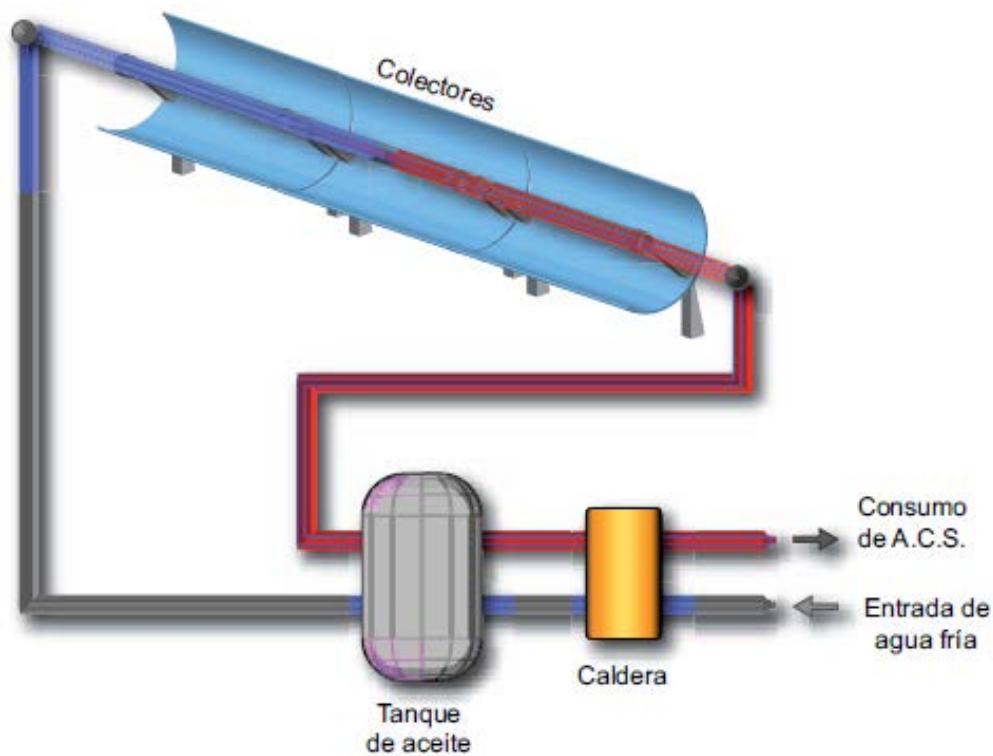
El captador cilindro-parabólico está constituido por un espejo de sección parabólica, que refleja la radiación solar directa concentrando la sobre un tubo receptor, por el que circula el fluido, colocado en la línea focal de la parábola, pudiendo acoplarse linealmente con otros captadores. Estos captadores de concentración con foco lineal, pueden operar hasta

temperaturas del orden de 450 °C, no obstante las aplicaciones para media temperatura alcanzan los 200 °C.

- Captadores Fresnel

Los sistemas de concentración solar lineal Fresnel constituyen una tecnología cuyo principio de funcionamiento es similar, en concepto, a la de los captadores solares cilindro parabólicos. Los rayos solares inciden sobre una superficie reflectora que refleja el rayo hacia un absorbedor situado en un plano diferente al de reflexión.

Figura 10 Esquema conceptual de un sistema captador solar térmico de media temperatura.
Fuente: [8]



Tecnologías de alta temperatura

Los sistemas de espejos concentradores utilizados en las tecnologías solares de alta temperatura son sistemas de enfoque puntual o lineal. Los sistemas lineales concentran la radiación unas 1000 veces y se obtienen unas temperaturas de trabajo de hasta 550°C, mientras que los sistemas puntuales pueden concentrar mucho más y lograr unas temperaturas de trabajo de más de 1.000°C.

Las tecnologías de alta temperatura o energía termosolar utiliza la luz solar directa, denominada ‘radiación directa’ o radiación directa normal (DNI). Se trata de la luz solar que no es desviada por nubes, humo o polvo suspendido en la atmósfera y que llega a la superficie terrestre en rayos paralelos para su concentración. Este tipo de tecnologías necesitan que la radiación solar al menos sea de 2.000 kWh/m²/año, siendo las mejores ubicaciones los lugares con más de 2.800 kWh/m²/año. [10]

Estos sistemas concentran la energía del sol para convertirla en calor a alta-media temperatura. Este calor se utiliza después para generar electricidad de forma convencional, por ejemplo, con una turbina de vapor o de gas o un motor Stirling. El calor solar recogido durante el día puede también almacenarse en un medio líquido o sólido, como las sales fundidas, materiales cerámicos, hormigón o mezclas de sales de fase cambiante, y puede extraerse durante la noche del medio del almacenamiento para mantener en funcionamiento la máquina térmica.

Los subsistemas empleados en esta tecnología dependen del tipo de instalación, pero en general los subsistemas básicos serían:

1) Subsistema de Captación

Consiste en los captadores solares y el circuito hidráulico.

2) Subsistema de intercambiador de tanques de aceite

3) Subsistema de evaporación de gases

4) Subsistema de conversión de energía

Consiste en los sistemas donde se transforma la energía solar en energía térmica (intercambiadores fluido/fluido) o en energía mecánica. Además de todos los elementos hidráulicos para su correcta operación.

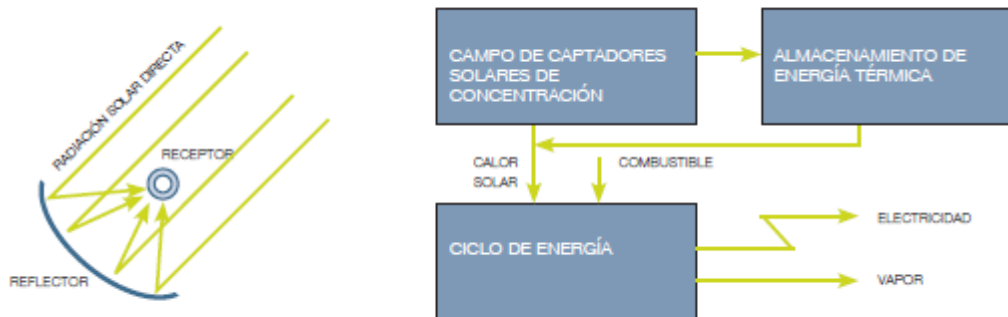
5) Subsistema de generación de energía eléctrica

Consisten en turbina de vapor o de gas, motor Stirling, etc...

6) Subsistemas de gestión y control

La tecnología solar térmica de alta temperatura se suele destinar fundamentalmente a la generación de energía eléctrica.

Figura 11 Esquema conceptual de un sistema captador solar térmico de alta temperatura.
Fuente: [10]



Existen cuatro tecnologías comerciales de los sistemas solares de media/alta temperatura:

- Captadores cilindro parabólicos, sistema de concentrador lineal
- Captadores Fresnel, sistema de concentrador lineal
- Captadores de receptor central o de torre, sistema de concentrador central
- Captadores de discos parabólicos, sistema de concentrador puntual

- Concentradores Cilindro Parabólicos

Se utilizan reflectores de espejo en forma cilindro parabólico para concentrar la luz solar en tubos receptores térmicamente eficientes ubicados en la línea focal de la parábola. Normalmente los canales están diseñados para seguir el sol en un eje, predominantemente norte-sur. Se hace circular por esos tubos un fluido de transferencia térmica, como aceite térmico sintético. El fluido se calienta a unos 400°C mediante los rayos solares concentrados y se bombea por una serie de intercambiadores térmicos para producir un vapor supercalentado, que se convierte en energía eléctrica en un generador de turbinas de vapor convencional que puede formar parte de un ciclo de vapor convencional o integrarse en un ciclo combinado de turbinas de vapor y gas.

- Concentradores Lineales de Fresnel

Un conjunto de reflectores casi planos concentran la radiación solar en receptores lineales invertidos elevados. El agua que fluye por los receptores se convierte en vapor. Este sistema es de concentración lineal, similar a un canal parabólico, con la ventaja de su bajo coste en soporte estructural y reflectores, juntas fijas del fluido, un

receptor separado del sistema de reflectores, y grandes longitudes focales que permiten utilizar espejos planos. Esta tecnología es contemplada como una alternativa potencial de menor coste a la tecnología de canales parabólicos para la producción de calor de proceso solar.

- Concentradores de receptor central

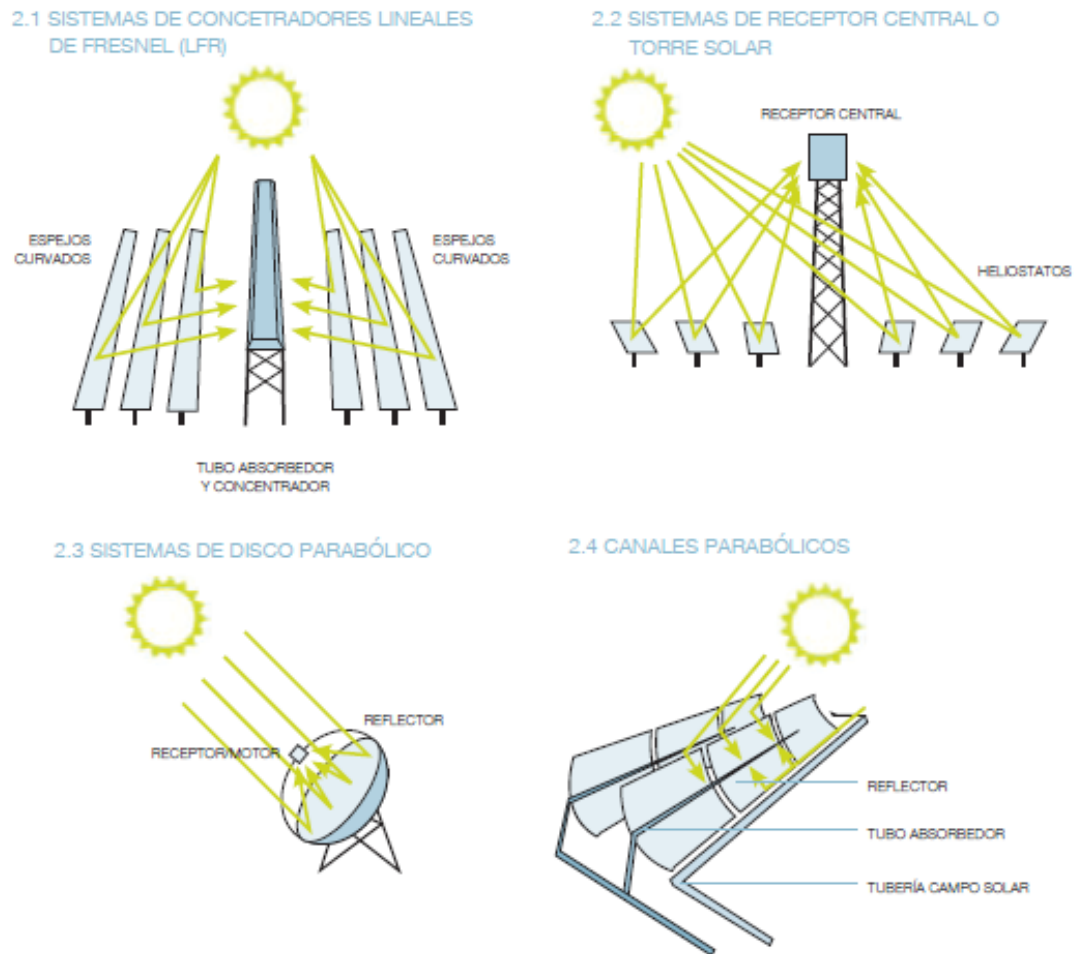
Los sistemas de receptor central (o torres de energía) utilizan un campo de espejos distribuidos (heliostatos) que realizan un seguimiento individual del sol y dirigen la luz solar hasta la parte superior de una torre. Concentrando la luz solar de 600 a 1.000 veces se logran unas temperaturas de 800°C a más de 1000°C. La energía solar es absorbida por un fluido de trabajo y se emplea después para generar vapor para accionar una turbina convencional. En más de 15 años de experimentación en todo el mundo, las plantas con torres de energía han probado su viabilidad desde el punto de vista técnico en proyectos que emplean diferentes medios de transferencia térmica (vapor, aire y sales fundidas) en el ciclo térmico y con diferentes diseños de heliostatos.

Las altas temperaturas posibles en las torres solares pueden aplicarse no sólo para accionar los ciclos de vapor, sino también para las turbinas de gas y los sistemas de ciclo combinado. Estos sistemas pueden lograr hasta el 35% de eficiencia pico y el 25% de eficiencia eléctrica solar anual cuando acompañan a una central térmica de ciclo combinado. [10]

- Sistemas de Disco Parabólico

Un reflector parabólico en forma de disco concentra los rayos solares en un receptor situado en el punto focal de un disco. La radiación de los rayos concentrados se absorbe en el receptor para calentar un fluido o gas (aire) a unos 750°C. Este fluido o gas se utiliza para generar electricidad en un pequeño pistón o motor Stirling o una micro turbina, conectada al receptor.

Figura 12 Concentradores de media/alta temperatura. Fuente: [10]



Sistemas solares fotovoltaicos

Los sistemas solares fotovoltaicos son aquellos que transforman directamente la luz solar en electricidad. Es una tecnología que forma parte de las energías renovables, encontrándose hoy en día en plena madurez debido al gran crecimiento que ha experimentado su desarrollo y aplicaciones.

La energía solar fotovoltaica se genera a través de la transformación directa e inmediata de la radiación del sol en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. Esta transformación se lleva a cabo en las denominadas "células solares o fotovoltaicas" que están hechas de material semiconductor, la mayoría de silicio. Cuando la luz solar incide en la célula, los fotones transmiten su energía a los electrones del material semiconductor moviéndose, lo que genera una corriente

eléctrica que se dirige a un circuito externo. Los módulos fotovoltaicos están compuestos de células fotovoltaicas unidas eléctricamente entre sí y la energía eléctrica producida es en corriente continua. Por lo tanto, estos sistemas requieren elementos de electrónica de potencia para transformar la DC en AC.

Los subsistemas empleados en esta tecnología dependen del tipo de instalación, pero en general los subsistemas básicos serían:

- 1) Subsistema Generador (módulos FV)
- 2) Subsistema acondicionamiento de potencia (inversor)
- 3) Subsistema de protecciones (cajas de protección de AC y DC)
- 4) Subsistema eléctrico (cableado de AC y DC)
- 5) Subsistemas de gestión y control

Entre las utilidades más extendidas basadas en esta fuente de energía figuran la producción de energía eléctrica, y en combinación con otros sistemas térmicos (convencionales o solares) para la climatización de espacios.

En este documento las células fotovoltaicas se clasifican en dos grandes grupos según la estructura base del material absorbente que capta la radiación solar: Obleas (wafer) y capa delgada (thin film) [11].

- Wafer o oblea (principalmente células de silicio cristalino)

Las células de silicio cristalino están hechas de láminas finas cortadas a partir de un único cristal de silicio (monocristalino) o de un bloque de cristales de silicio (policristalino). Su eficacia varía entre 12% y 21%. Es la tecnología más común, que representa alrededor del 90% del mercado actual.

Los dos tipos principales de células cristalinas se pueden distinguir en:

- Monocristalino (mono c-Si)
- Policristalino (multi c-Si)

- Thin Film o capa delgada

Los módulos de capa fina se construyen mediante el depósito de capas extremadamente delgadas de materiales fotosensibles sobre un soporte de bajo costo, tales como vidrio, acero inoxidable o plástico.

Los procesos de fabricación de películas delgadas dan como resultado menores costos de producción en comparación con la tecnología cristalina, con más alta

densidad de materiales. Esta ventaja de precio está contrarrestada por unos índices de eficiencia más bajos (del 6% al 15%). Sin embargo, este es un valor medio y todas las tecnologías de película fina no tienen la misma eficacia.

Hay cuatro tipos de módulos de capa fina disponibles comercialmente clasificados en función del material activo usado:

- 1) Silicio amorfo (a-Si)
- 2) Teluro de cadmio (CdTe)
- 3) Copper indium gallium selenide (CIS), Copper indium gallium (di)selenide (CIGS)
- 4) Células de multi unión (a-Si / m-Si)

Aunque las células de CdTe, CIS, CIGS pueden alcanzar una mayor eficiencia que los de a-Si, el silicio tiene la ventaja de ser más fácil de disponer en la naturaleza, por lo cual es la tecnología predominante actualmente.

Tabla 8 Eficiencia de las células fotovoltaicas. Fuente: [12]

Tecnología	Eficiencia
Monocrystalino (mono c-Si)	12,5-15%
Policristalino (multi c-Si)	11-14%
Copper Indium Gallium Selenide (CIGS)	10-13%
Teluro de cadmio (CdTe)	9-12%
Silicio amorfo (a-Si)	5-7%

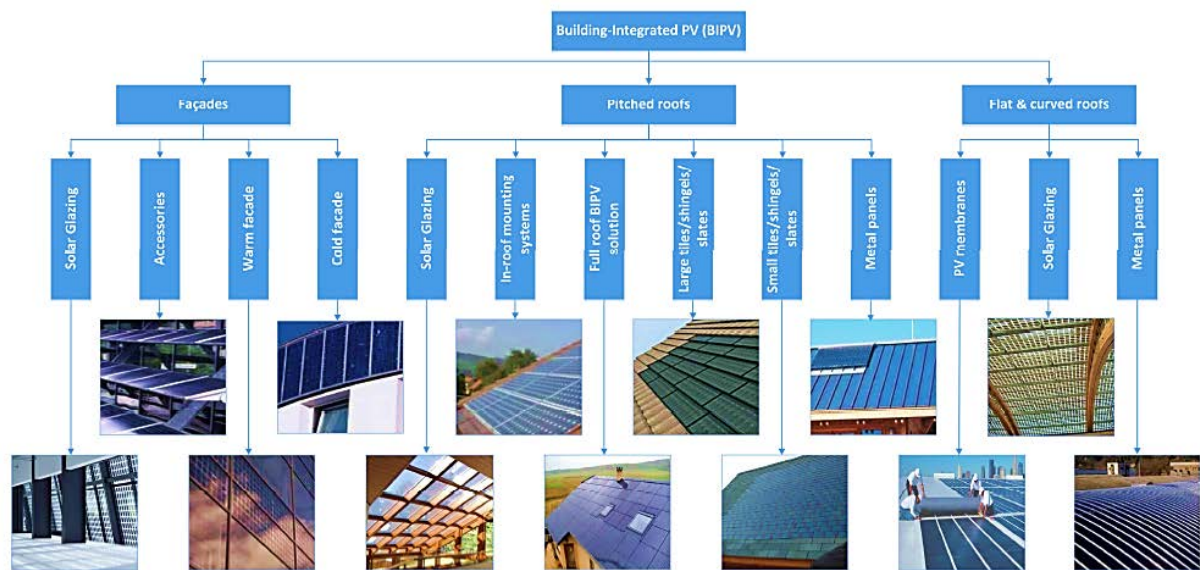
Los módulos de capa delgada tiene un mejor coeficiente de temperatura, su comportamiento en los meses de mayor radiación es mejor que los módulos cristalinos, debido a la reducción de la potencia de salida para altas temperaturas.

Los sistemas fotovoltaicos se pueden implementar fácilmente en el sector de la edificación y en función de su interacción con el edificio se podrían clasificar en tres grupos:

- 5) Sistemas montados en estructuras. Son los sistemas fotovoltaicos instalados en la cubierta del edificio sin que hay ninguna interacción entre ellos.

- 6) BAPV, de las siglas en inglés Building Applied PhotoVoltaic. Son sistemas fotovoltaicos de superposición arquitectónica,
- 7) BIPV, de las siglas en inglés Building Integrated PhotoVoltaic. Son sistemas fotovoltaicos integrados en los edificios, es decir, los módulos fotovoltaicos forman parte de la estructura o envoltorio del edificio, como lucernarios, atrios, brisise-soleil, etc... La integración arquitectónica de los sistemas fotovoltaicos se clasifican en función de la ubicación de ellos en el edificio: fachada o cubierta.

Figura 13 BIPV Categorías. Fuente: [13]



Los sistemas BIPV y BAPV en la mayoría de ocasiones cumplen simultáneamente las funciones de sistemas solares activos y pasivos.

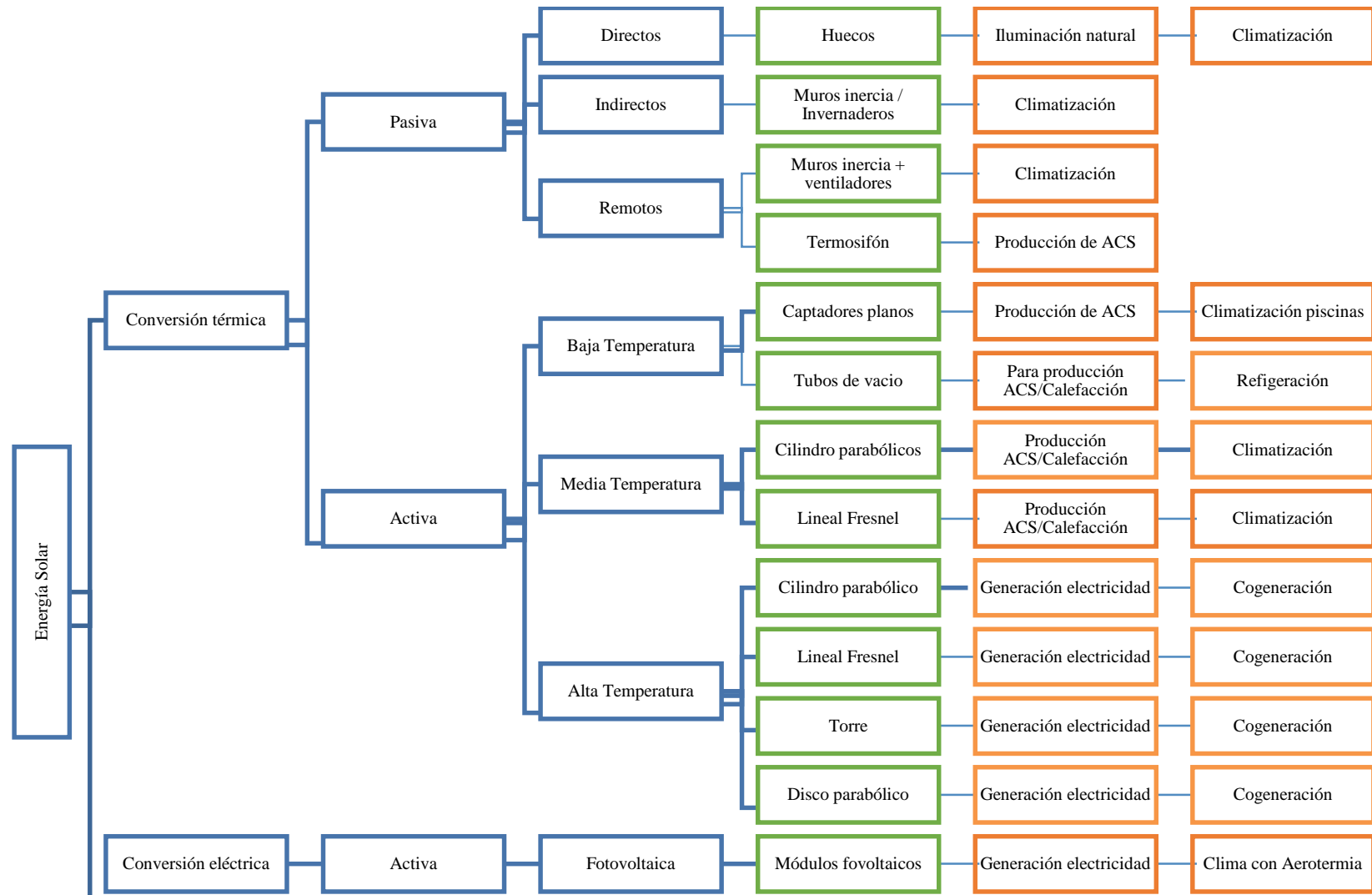
Por ejemplo, en el caso de un lucernario fotovoltaico, los vidrios convencionales son substituidos por módulos fotovoltaicos cristalinos semi-transparentes (entre un 20-40% de transparencia), donde los módulos FV generan energía eléctrica (forma activa) y a la vez, permiten la entrada de luz natural al espacio mejorando las condiciones térmicas de confort internas del recinto (forma pasiva).

A continuación se muestra un resumen de las tecnologías y sus aplicaciones para los edificios.

Tabla 9 Clasificación de las tecnologías solares activas

Transformación	Clasificación	Equipo principal	Aplicaciones
Conversión térmica	Baja temperatura	Captador plano Tubo de vacío	Agua caliente sanitaria Calefacción piscinas Calefacción espacios Refrigeración de espacios
	Media /alta temperatura	Cilindro-parabólicos Lineales de Fresnel	Agua caliente sanitaria y vapor de agua, industria, hospitales. Calefacción grandes espacios Distribución Heating Refrigeración de espacios
	Alta temperatura	Cilindro-parabólicos Lineales de Fresnel Receptor central Discos parabólicos	Venta de energía a la red
Conversión eléctrica	Fotovoltaica	Módulos fotovoltaicos	Venta de energía a la red; Bombeo de agua; Electrificación rural; Telecomunicación, etc

La siguiente figura representa esquemáticamente las diferentes tecnologías solares, para aprovechamiento térmico y eléctrico que están disponibles comercialmente en el mercado.



3.3 Ejemplos de implementación. Proyecto PSE-ARFRISOL

El (PSE-ARFRISOL) es un Proyecto Singular Estratégico sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar que pretende demostrar que la arquitectura bioclimática, basada en el diseño arquitectónico y constructivo y la energía solar son los elementos básicos adecuados para conseguir que la edificación del futuro sea energéticamente eficiente.

El PSE-SRFRISOL ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC), inicialmente y posteriormente por el de Ciencia e Innovación (MICINN) y con fondos del Desarrollo Regional (FEDER) de la UE, así como con Ayudas Complementarias del Principado de Asturias y del EREN (Ente Regional de la Energía) de la Junta de Castilla y León.

El PSE-ARFRISOL tiene ámbito estatal y se ha llevado a cabo desde el 1 de Mayo de 2005 hasta el 31 de Julio de 2012, bajo la responsabilidad de 14 Instituciones, públicas y privadas, y coordinado por el CIEMAT.

El objetivo general del PSE-ARFRISOL, es la demostración de la adecuación de la arquitectura bioclimática y de la energía solar empleada en edificios para el acondicionamiento tanto con fines térmicos, para calefacción, como para refrigeración, y fotovoltaicos para producir energía eléctrica, como elementos básicos para la construcción del futuro, empleando varios edificios públicos simbólicos, tanto de nueva planta como a rehabilitar, construidos en cinco emplazamientos con condiciones climatológicas distintas (Almería, Madrid, Soria y Asturias) considerados como prototipos experimentales “Contenedores–Demostradores de Investigación” (C-DdI’s).

El fin de la investigación es que cada construcción utilice entre un 10% y un 20% de la energía convencional, esta reducción de la demanda es gracias a la implementación de sistemas solares pasivos basados en el diseño arquitectónico y constructivo a partir del análisis exhaustivo del clima y del lugar, y de sistemas solares activos y de biomasa, que dotaran a cada C-DdI de las mejores condiciones de eficiencia energética.

Desde el punto de vista de **estrategias pasivas**, basadas en el diseño arquitectónico y constructivo, el informe concluye que las estrategias básicas, independientemente de la ubicación y las condiciones de contorno del lugar son:

- 1) Conseguir el máximo soleamiento con orientaciones principales al sur, ya que en todos los casos los periodos cuando la temperatura ambiente es fría, tiene más influencia que cuando la temperatura es cálida
- 2) Aprovechamiento de la inercia térmica efectiva mediante la colocación de la masa (generalmente muros de cerramiento) al interior y el aislamiento al exterior
- 3) Compacidad, definida como la superficie de la envolvente edificatoria dividido por el volumen que encierra, sucediendo que a mayor compacidad mejor comportamiento energético del edificio.
- 4) Diferenciación formal de los cerramientos y sus aislamientos en función de la orientación
- 5) Utilización de vidrios multicapa con cámaras al vacío
- 6) Utilización de carpinterías (si es posible, no correderas) con rotura de puentes térmicos.
- 7) Utilización de elementos de protección solar, fundamentalmente al sur y al oeste, en fachadas y cubiertas, diseñados para que permitan el acceso solar durante las épocas infra calentadas (generalmente de octubre a marzo) y protejan del mismo durante las épocas infra calentadas (generalmente de marzo a octubre)
- 8) Utilización de sistemas naturales de ventilación cruzada
- 9) Iluminación natural, a ser posible, desde el norte
- 10) Utilización de materiales, extraídos o fabricados en la zona, para evitar en lo posible, la energía embebida por los materiales en el transporte.

Desde el punto de vista de **estrategias activas**, los sistemas de climatización de los C-DdI se realizaron por integración de subsistemas diferenciados, controlados de forma conjunta. Los subsistemas considerados son:

- 1) Subsistema solar de generación de calor, consistente en el circuito primario de los captadores solares térmicos con los componentes hidráulicos necesarios para su funcionamiento.
- 2) Subsistema de generación de frío mediante bomba de absorción, formado por las propias bombas de absorción, y el campo de paneles radioconvectivos, así como los componentes hidráulicos necesarios para su funcionamiento.
- 3) Subsistema de generación de calor de apoyo, formado por calderas de biomasa, gas o bomba de calor y los componentes hidráulicos necesarios para su funcionamiento.

- 4) Subsistema de generación de frío de apoyo, formado por UTAs, enfriadoras o bomba de calor y los componentes hidráulicos necesarios para su funcionamiento.
- 5) Subsistema de acumulación, mediante depósitos acumuladores de agua y los componentes hidráulicos necesarios para su funcionamiento.
- 6) Subsistema de disipación, formado por circuitos de intercambio con el terreno, horizontales y verticales (geotermia), sistemas de disipación nocturna radioconvectiva o torres de refrigeración y los componentes hidráulicos necesarios para su funcionamiento.
- 7) Subsistema de distribución de calor, formado por unidades de tratamiento de aire, inductores, fancoils, suelo radiante y los componentes hidráulicos necesarios para su funcionamiento.
- 8) Subsistema de distribución de frío, formado por unidades de tratamiento de aire, inductores, fancoils, suelo radiante refrescante y los componentes hidráulicos necesarios para su funcionamiento.

Los sistemas de climatización de todos los C-DdI están formados por la combinación de estos subsistemas, de forma que han sido analizados con una metodología común.

Tabla 10 Sistemas solares activos implementados en los 5 C-DdI en el proyecto PSE-ARFRESOL. Fuente: [13]

Subsistema	C-DdI-SP2	C-DdI-SP3	C-DdI-SP4	C-DdI-SP5	C-DdI-SP6
Generación solar de calor	Captadores solares planos	Captadores solares planos con aislamiento transparente	Captadores solares planos con aislamiento transparente	Captadores solares planos gran formato	Captadores solares planos con aislamiento transparente
Generación de frío mediante bomba de absorción	1 bomba de absorción LiBr	4 bombas de absorción LiCl	4 bombas de absorción LiCl	5 bombas de absorción LiCl	5 bombas de absorción LiCl
	Yazaki	Climatewell	Climatewell	Climatewell	Climatewell
	70 kW	10kW/cu	10kW/cu	10kW/cu	10kW/cu
Generación de calor de apoyo	Caldera de gas	Caldera de gas de condensación	Bomba de calor (Agua-aire +agua-agua)	Caldera de biomasa	Caldera de biomasa
Generación de frío de apoyo	No tiene	Enfriadoras	Bomba de calor	No tiene	No tiene
Acumulación	Depósitos 4000 litros	Depósitos 4000 litros	No tiene	Depósitos 2000 litros	Depósitos 3000 litros

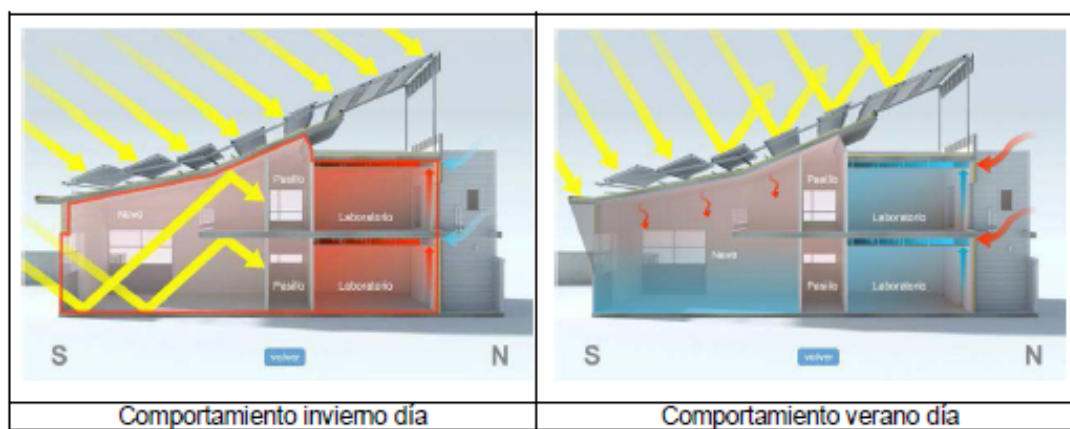
Disipación	Pozos geotérmicos y/o Torre de refrigeración	Torre de refrigeración	Pozos geotérmicos, paneles radioconvectivos y/o Torre de refrigeración	Pozos geotérmicos	Pozos geotérmicos
Distribución de calor	Fancoils	Inductores	Suelo radiante + Fancoils	Suelo radiante + Fancoils	Suelo radiante + Fancoils
Distribución de frío	Fancoils	Inductores	Fancoils	Fancoils	Fancoils

A continuación se representa una tabla resumen con los resultados obtenidos en la implementación de diferentes sistemas solares pasivos y activos en los cinco edificios públicos que el proyecto PSE-ARFRISOL ha realizado.

Tabla 11 Resumen de los resultados energéticos y ahorros alcanzados para los 5 C-DdI en el proyecto PSE-ARFRESOL. Fuente: [13]

C-DdI's	Sup. Construida [m ²]	Coste [€/m ²]	Ahorros				Demanda Energética Final [kW.h/m ² .año]	
			Sistema Pasivo [%]	Sistema Activo [%]	Biomasa [%]	Total [%]	Cale	Refri
SP2-CIESOL	1.072	1.059	40	56	----	96	13,96	9,49
SP3-CIEMAT	2.047	2.635	51	43	----	94	8,33	35,23
SP4-PSA	1.115	2.248	62	34	----	96	13,40	23,04
SP5-Fund. BARREDO	1.346	2.858	59	19	22	100	17,34	14,60
SP6- CEDER	1.366	2.512	40	34	26	100	42,21	13,07

Figura 14. Ejemplo de estrategias pasivas implemetadas en el C-DdI SP2 (CIESOL)-UAL



4 CASOS EXPERIMENTALES

En este apartado se van a exponer los resultados energéticos obtenidos en dos plantas pilotos solares enmarcadas en el proyecto europeo DIDSOLIT-PB, acrónimo de “*Development & Implementation of Decentralised Solar Energy-Related Innovative Technologies for Public Buildings in the Mediterranean Basin Countries*”.

Uno de los objetivos del proyecto DIDSOLIT-PB era estudiar la viabilidad técnica y económica de la implementación de sistemas de concentración solar de pequeña potencia en edificios públicos. Para tal fin se disponía de una línea de financiación para la ejecución de dos sistemas piloto de dicha tecnología.

Las estrategias seguidas para dicho estudio fueron:

- 1) Estudio del estado de arte de las tecnologías de concentración
- 2) Búsqueda de productos comerciales, donde algunos de los criterios de la investigación fueron:
 - 8) Productos aptos para implementar en zonas urbanas
 - 9) Productos aptos para ubicar en las cubiertas de los edificios
 - 10) Productos comerciales con sus certificados europeos correspondientes
 - 11) Productos de pequeña potencia, para la producción de energía descentralizada.
- 3) Contacto con fabricantes y proveedores
- 4) Estudio comparativo de los diferentes productos comerciales
- 5) Estudio económico y técnico de la viabilidad de la implementación
- 6) Búsqueda de un edificio público para la ubicación de la planta piloto
- 7) Ejecución de la planta piloto
- 8) Evaluación de los costes de implementación (capital cost)
- 9) Registro de los datos energéticos en la plataforma web del proyecto
- 10) Informe final por tecnología con la viabilidad económica de su implementación

4.1 Aprovechamiento térmico

Esta sección se basa en los resultados obtenidos para una planta piloto de la tecnología de concentración solar de captadores lineales parabólicos, para la producción de ACS y refuerzo a la calefacción mediante una máquina de absorción, implementada en un edificio público de oficinas en el municipio de Sant Cugat del Vallés.

Los datos del edificio de oficinas son:

Location:	Sant Cugat del Vallés, Spain
Ownership:	Sant Cugat Council
Use:	Office and Residential
Building surface:	8.000 m ² (approx.)
Electricity consumption:	1.205.660 kWh/y (approx.)

El principio de funcionamiento de la planta piloto consiste básicamente en que el captador solar eleve la temperatura de un fluido, en nuestro caso aceite sintético, para intercambiar esta energía térmica al sistema convencional de producción de ACS y calefacción. El sistema convencional de ACS y CALE está compuesto por un conjunto de 2 depósitos de 2000 litros conectados en serie, se alimentan mediante un sistema de cogeneración con una turbina de gas para la producción de ACS y calefacción y una máquina de absorción para la refrigeración.

El sistema solar instalado se compone principalmente de estos grandes bloques:

1) Captador solar cilindro parabólico

Después de estudiar las diferentes opciones comerciales disponibles para la tecnología cilindro-parabólica (PT) para la planta piloto, se optó por instalar el captador solar de la casa comercial SOLTIGUA modelo PTMx-18.

El propio fabricante proporciona el captador solar, su estructura de soporte y un PLC que controla y gestiona el campo solar.

En el Anexo 1 se adjunta información técnica del captador solar.

A continuación se muestra las principales características del captador solar:

Figura 15 Captador cilindro parabólico modelo PRMx-18 de Soltigua



Tabla 12 Características técnicas del captador solar modelo PTMx-18 de Soltigua

Thermal Power Output		23	kW
HTF Outlet Temperature ⁴			
Nominal		240	°C
Maximum		250	°C
Minimum		180	°C
HTF Flow ¹			
Nominal		3500	l/h
Maximum		7200	l/h
Minimum		3000	l/h @ 100°C
Environment Temperature			
Maximum		40	°C
Minimum		0	°C
Operation			
Maximum Working Temperature		250	°C
Maximum Working Pressure		9	bar
Environment Actions			
Maximum Wind Load		1980	N/m ²
Maximum Snow Load		1500	N/m ²
Mechanical Connections			
HTF Connection		Flange: DN 32	DN
Weight per Collector		1408	kg
Dimensions			
Aperture Area per Collector		40.8	m ²
Width		2.37	m
Length		19.7	m
Maximum Height		2.57	m

⁴Reference heat transfer fluid: Therminol 66

Ecuación 1 Curva de rendimiento del captador solar PTMx-18 de Soltigua

$$P = \eta \cdot A \cdot DNI \quad (4)$$

$$\eta = k_L \cdot 0.747 - 0.64 \cdot \frac{\bar{T}_f - T_{amb}}{DNI} \quad (5)$$

$$\bar{T}_f = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (6)$$

Donde:

A	Superficie de abertura del captador (m ²)
DNI	Direct Normal Irradiance (W/m ²)
k_L	Ángulo de modificación de incidencia (IAM)
\bar{T}_f	Temperatura media del fluido caloportador (°C)
T_{amb}	Temperatura ambiente (°C)
T_{in}	Temperatura de entrada del fluido (°C)
T_{out}	Temperatura de salida del fluido (°C)

2) Sistema de fluido de intercambio (HTS)

En este caso se ha optado por un aceite sintético como fluido caloportador, de nombre comercial Terminol 66 de la empresa BP.

El sistema consiste en el fluido Terminol 66 y todos los elementos necesarios para su correcta operación; sistema de circulación, sistema de protección de sobre temperatura, circuito hidráulico de tuberías de acero, aislamiento, válvulas, etc...

En el Anexo 2 se adjunta:

- A2.1_Información técnica del aceite sintético
- A2.2_Planos del sistema de protección para sobre temperaturas que se ha diseñado para este circuito.
- A2.3_Características técnicas de la bomba de aceite

3) Sistema de soporte

Consiste en la estructura de soporte donde se sujetan las estructuras primarias del captador.

4) Sistema de conversión de energía

Consiste en el intercambiador tubular de aceite/agua y todos sus accesorios necesarios para su funcionamiento; sistema de circulación, circuito hidráulico de tuberías de cobre, aislamiento, válvulas, etc...

5) Sistema de monitorización

Consiste en la instalación de un gestor energético de la casa comercial Circutor modelo EDS Luxe. Con dicho componente se centraliza el almacenamiento de los datos obtenidos para todas las instalaciones ejecutadas en el proyecto DIDSOLIT y poder visualizarlas en la plataforma web.

En el Anexo 3 se adjunta:

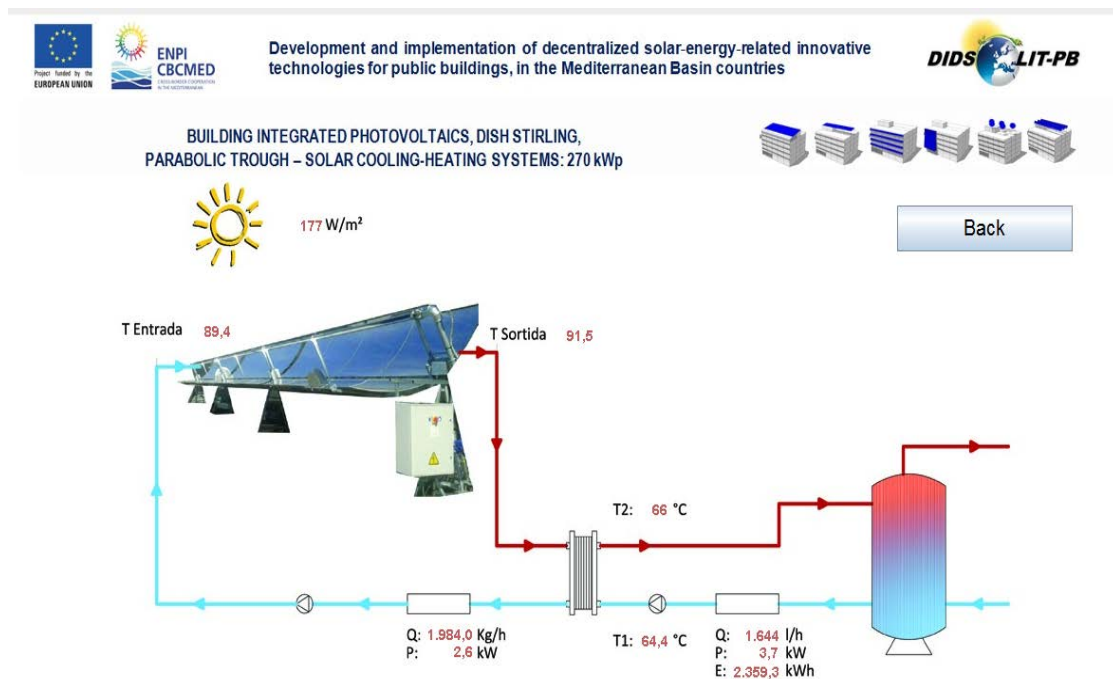
- A3.1 Implementación del captador en la cubierta del edificio
- A3.2 Esquema hidráulico del sistema solar

A continuación se presenta algunas fotos del sistema.



Los datos del sistema parabólico lineal se han tomado de la plataforma de monitorización del proyecto europeo DIDSOLIT, que corresponderían a la numeración 20 de la pantalla principal. (<http://monitoritzacio.dyndns.org:1234/html5/index.html>). Esta plataforma está basada en el programa POWER STUDIO SCADA de la casa comercial Circutor.

Figura 16 Esquema de la instalación solar de parabólico lineal. Fuente: proyecto DIDSOLIT



Para estudiar el comportamiento de la planta piloto de la tecnología parabólica lineal (PT), se han registrado los valores del campo solar o subsistema de captación y el sistema de intercambio o subsistema de conversión de energía. En este caso no se han registrado valores de consumo del edificio, con lo que se podría haber calculado la fracción solar aportada por el sistema solar al sistema convencional de producción de ACS y calefacción del edificio.

En la Tabla 13 se presenta la lista de variables disponibles desde el servidor de la plataforma web de dicho proyecto para la instalación experimental.

Tabla 13 Variables registradas

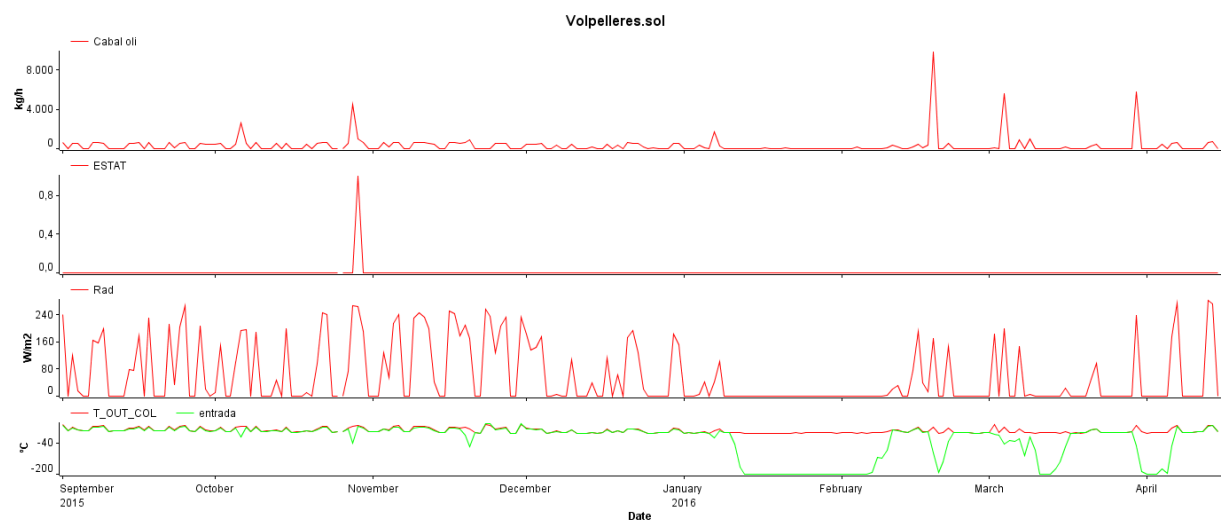
Variable	Abreviatura	Unidades	Origen datos
Data tiempo	t	dd/mm/aa hh:mm:ss AM/PM	PLC
Subsistema de captación – SOL			
Radiación solar	G	W/m ²	PLC
Estado del sistema	S	---	PLC
Temperatura entrada captador	T _{in-sol}	°C	Sonda térmica - PLC
Temperatura salida captador	T _{out-sol}	°C	Sonda térmica - PLC
Caudal másico aceite	\dot{m}_{sol}	Kg/h	Medidor de cabal
Subsistema de intercambio – CE (Circuit Exchange)			
Temperatura entrada intercambiador	T _{in-ce}	°C	Sonda térmica
Temperatura salida captador	T _{out-ce}	°C	Sonda térmica
Caudal másico agua	\dot{m}_{ce}	Kg/h	Medidor de cabal

La instalación empezó a operar a principios de Julio de 2015, por lo tanto, los datos a estudiar serán los referidos desde esa fecha hasta el 15/04/2016.

La datos recopilados de funcionamiento se han exportado a un archivo csv, para su posterior tratamiento con una hoja de cálculo Excel empleando tablas dinámicas y gráficas pivote.

En la Figura 17 se muestra los datos recogidos en el período de funcionamiento, donde se puede observar varias anomalías en la lectura de los datos.

Figura 17 Gráfica de los datos registrados de funcionamiento.



El primer paso ha sido el tratamiento de datos, se han descartado todos los valores que por diferentes razones no se han podido utilizar para este estudio.

Los criterios empleados para la eliminación de dichos valores han sido:

1) Adaptación a los requerimientos de la demanda

- Los fines de semana.

La instalación solar experimental está ubicada en un edificio de oficinas, por lo tanto, la demanda energética es nula para esos días.

- El sistema se ha programado para $S=0$ los fines de semana

Horario de funcionamiento de 09:00 a 16:30

El sistema se ha programado para $S=0$ a partir de las 16:30

2) Las anomalías en el sistema solar.

Tal como hemos descrito antes, el propio captador solar dispone de un autómata (PLC) que realiza la función de gestionar y controlar el sistema solar. Se encarga del sistema de seguimiento a un eje (norte-sur), los sensores climatológicos y la variable estado, entre otras.

Los problemas observados han sido:

- Problemas en la lectura del sensor de la radiación solar

Se han descartado los valores de $G < 0$

Se ha repuesto tres veces el sensor de radiación

- Problemas en la lectura del anemómetro

Se han descartado los valores de $S=0$

El fabricante tuvo que hacer cambios en la programación del PLC para suprimir la alarma sonora por viento, en ese período de tiempo el sistema estuvo parado.

- Problemas en la lectura de temperatura del fluido (aceite) a la salida del captador solar

Se han descartado todos los valores negativos

Se han descartado todos los valores donde $T_{out-sol} < T_{in-sol}$

- Problemas en la lectura del caudal másico de aceite

Se han descartado los valores muy elevados de caudal másico, el medidor de caudal tuvo que ser revisado por el fabricante al dar valores de medida fuera del rango de diseño.

El rango de trabajo del caudal másico es entre 0 – 3500 kg/h

3) Las paradas por mantenimiento y trabajos en cubierta.

El edificio de oficinas contaba con un sistema solar térmico de baja temperatura que tuvo que ser desplazado para poder ubicar el captador parabólico con

una orientación adecuada. En el transcurso de los trabajos de reubicar los captadores solares planos, el sistema estuvo parado para asegurar la integridad de los trabajadores. El sistema estaba en $S=0$.

Después de realizar este primer filtro en el registro de datos se observa que para varios días la potencia térmica producida por el sistema solar experimental es superior a la potencia solar térmica disponible en ese momento por la radiación recibida. Por lo tanto, se descartan todos los días donde la potencia experimental es superior a la potencia solar disponible. Una de las posibles causas de esta discrepancia de valores puede ser por los problemas en la lectura de la sonda térmica a la salida del campo solar, se ha observado que este comportamiento ocurre cuando los saltos térmicos son superiores a 20°C para valores pequeños de radiación.

De esta manera los datos útiles para poder estudiar el comportamiento del rendimiento de este tipo de captadores son para los siguientes días:

31/08/2015	20/11/2015	26/11/2015
27/11/2015	27/11/2015	01/12/2015
03/12/2015	04/12/2015	17/12/2015
21/12/2015	22/12/2015	23/12/2015
30/12/2015	21/12/2015	06/04/2016
07/04/2016	14/04/2016	

A partir de los datos antes mencionados proporcionados en el archivo CSV, se ha llevado a cabo el procesamiento de datos, que incluye:

- Energía Solar Disponible, E_{rad}

$$E_{rad} = \frac{G \cdot A}{1000} \cdot \frac{60}{3600} [kWh] \quad (7)$$

- Potencia Solar Disponible, P_{rad}

$$P_{rad} = \frac{G \cdot A}{1000} [kW] \quad (8)$$

- Energía Solar Producida por el Captador, E_{cap}

$$E_{cap} = \dot{m} \cdot ce \cdot \Delta T \cdot \frac{60}{3600} [kWh] \quad (9)$$

- Potencia Solar Producida por el Captador, P_{cap} [kW]

$$P_{cap} = \dot{m} \cdot ce \cdot \Delta T [kW] \quad (10)$$

- Eficiencia experimental del captador solar, μ_{cap} [%]

$$\eta_{cap} = \frac{P_{cap}}{P_{rad}} \cdot 100 [\%] \quad (11)$$

Donde:

G Radiación solar [W/m^2]

A Área de abertura del captador [m^2] $\rightarrow A=40.8 m^2$

\dot{m} Caudal másico del aceite, [kg/h]

ce Calor específico del aceite [kJ/Kg K] $\rightarrow ce=2.489 kJ/kg K$

ΔT Salto térmico del aceite [K]

A continuación se muestra la representación gráfica de los resultados obtenidos por el sistema experimental para los siguientes días:

- 31/08/2015
- 20/11/2015
- 26/11/2015
- 21/12/2015
- 06/04/2016
- 14/04/2016

Figura 18 Eficiencia energética de la instalación de colector cilindro-parabólico

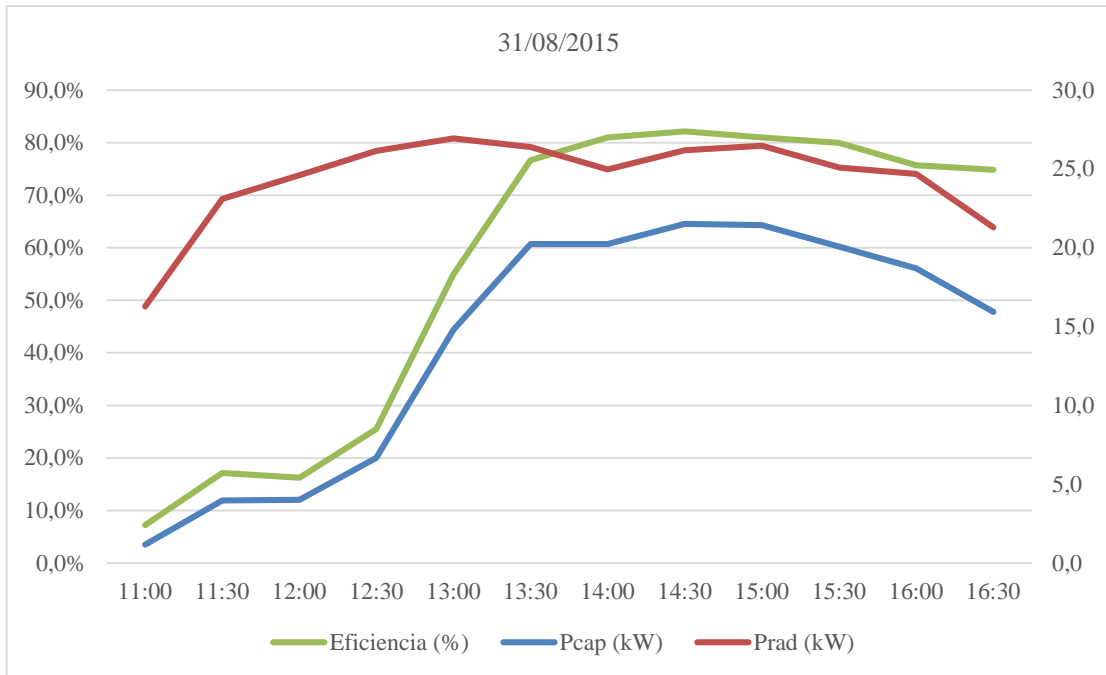


Figura 19 Perfil de temperatura de la instalación de colector cilindro-parabólico

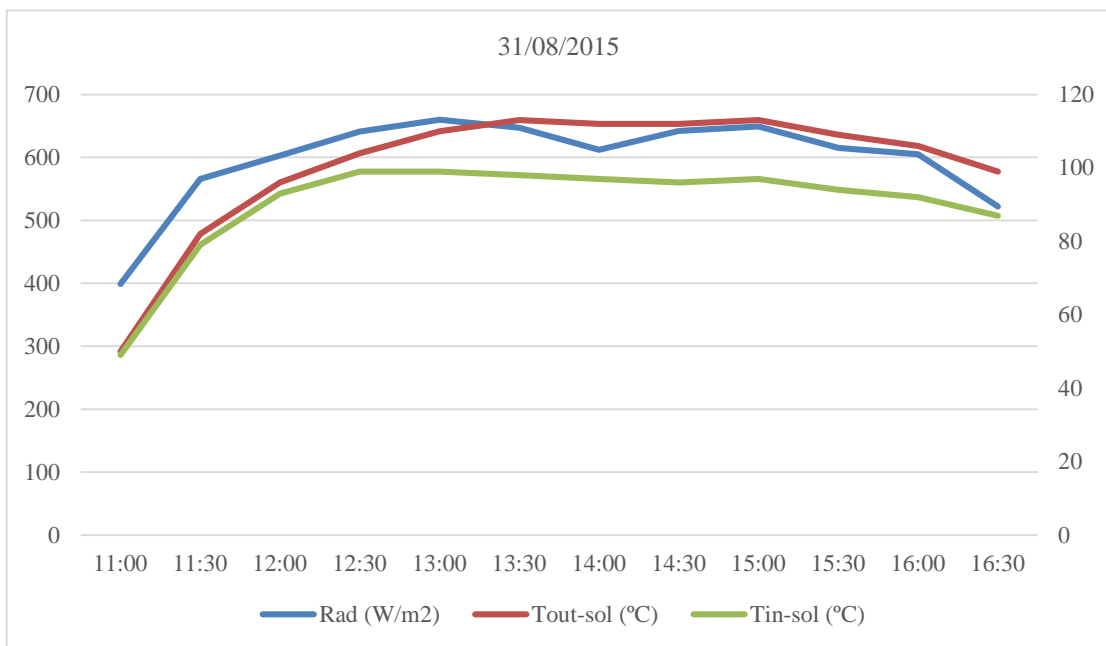


Figura 20 Perfil de temperatura de la instalación de colector cilindro-parabólico

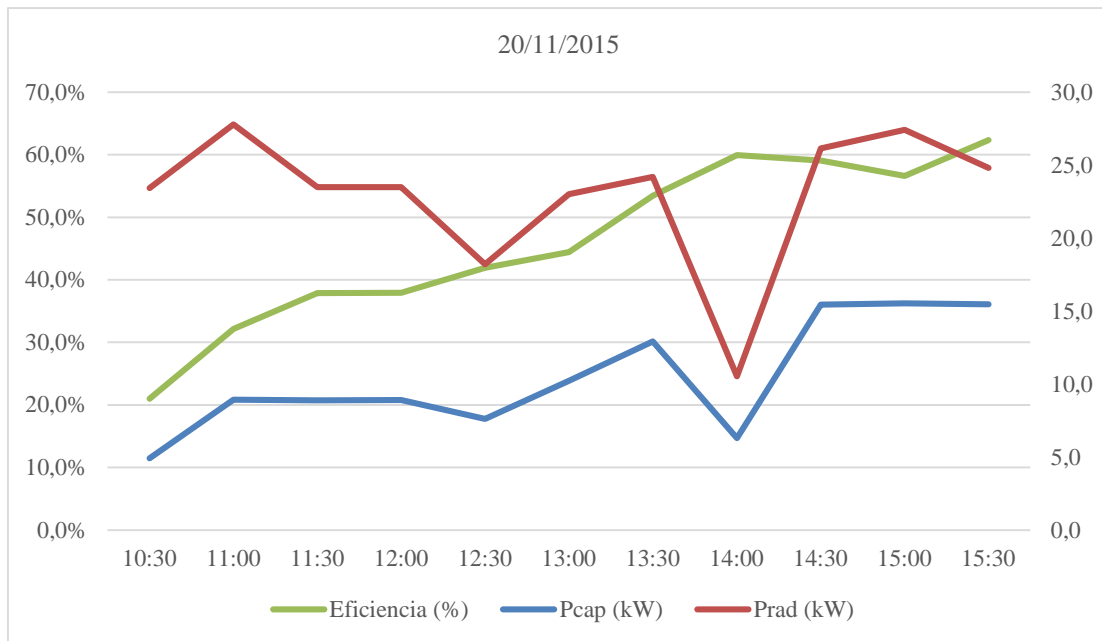


Figura 21 Eficiencia energética de la instalación de colector cilindro-parabólico

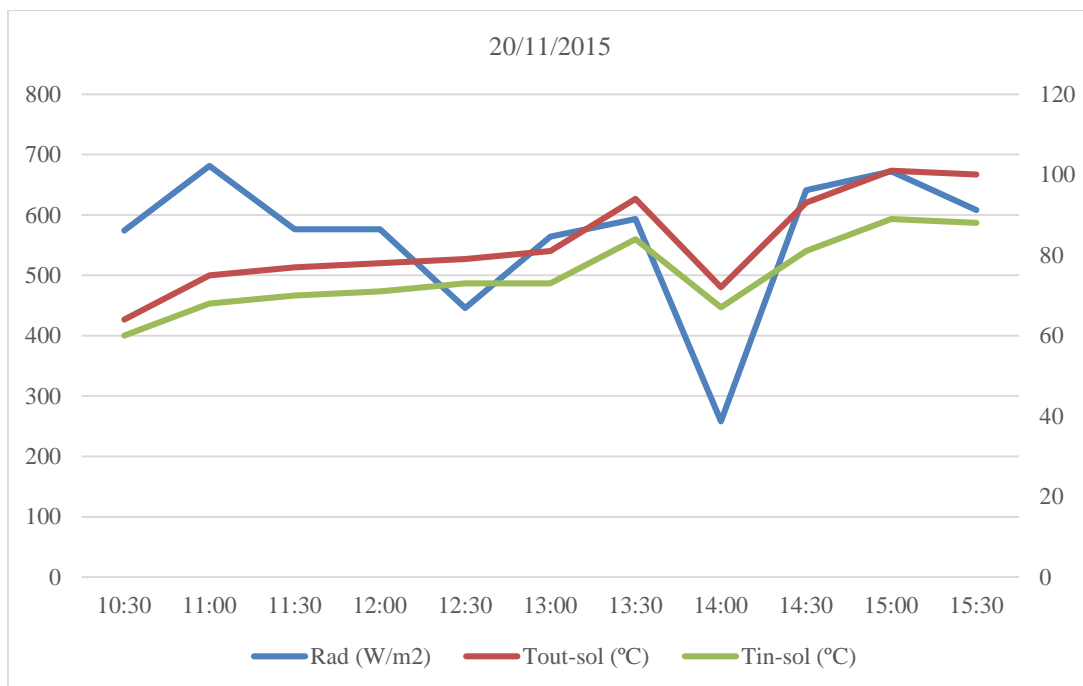


Figura 22 Eficiencia energética de la instalación de colector cilindro-parabólico

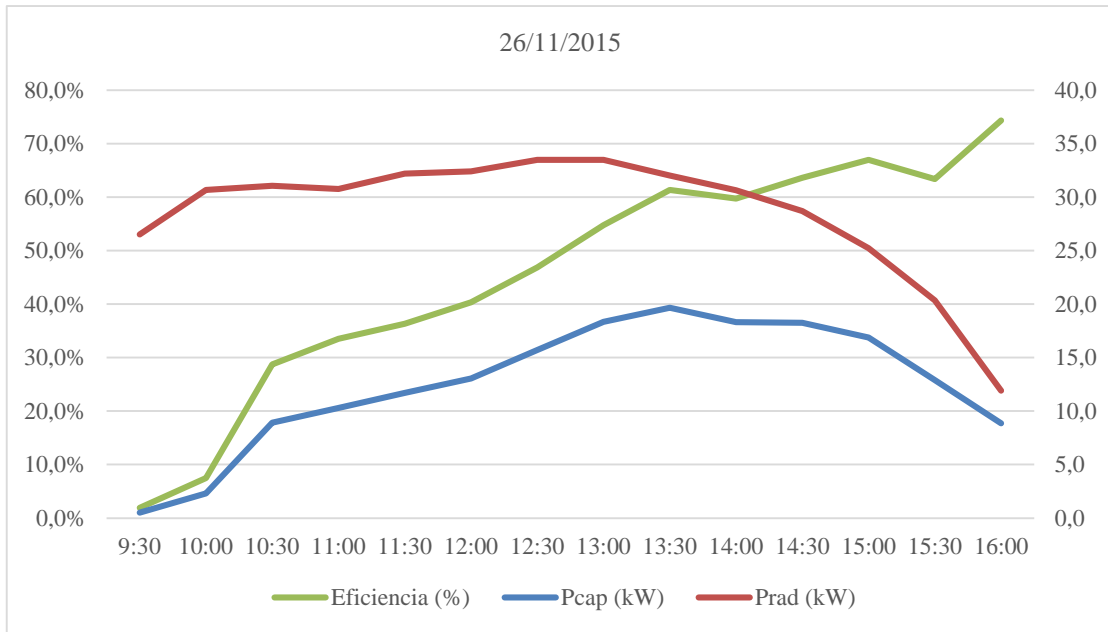


Figura 23 Perfil de temperatura de la instalación de colector cilindro-parabólico

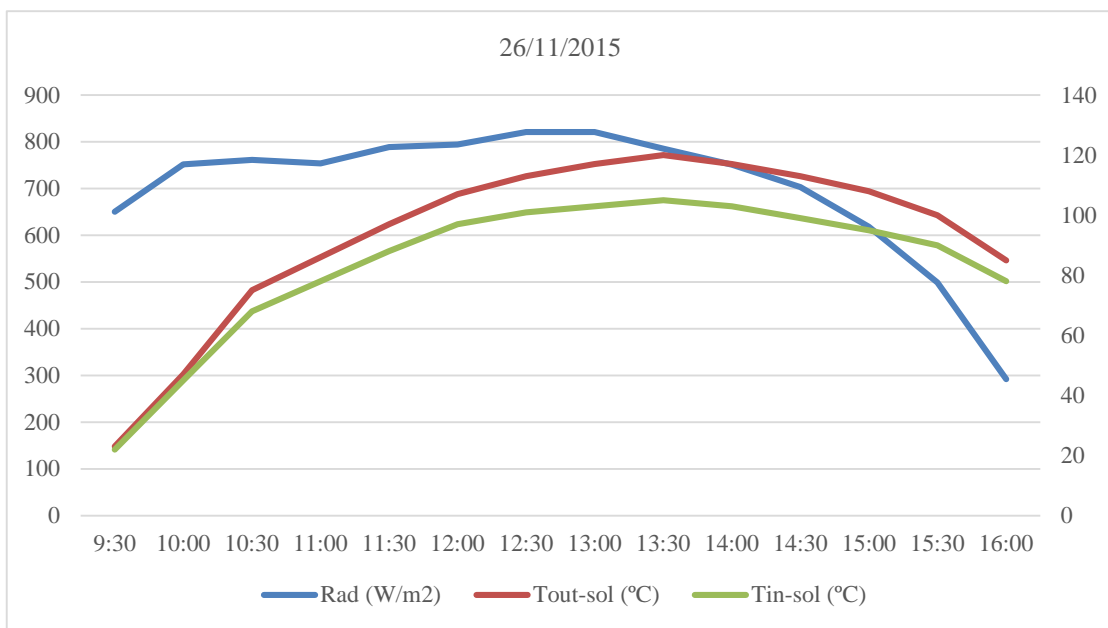


Figura 24 Eficiencia energética de la instalación de colector cilindro-parabólico

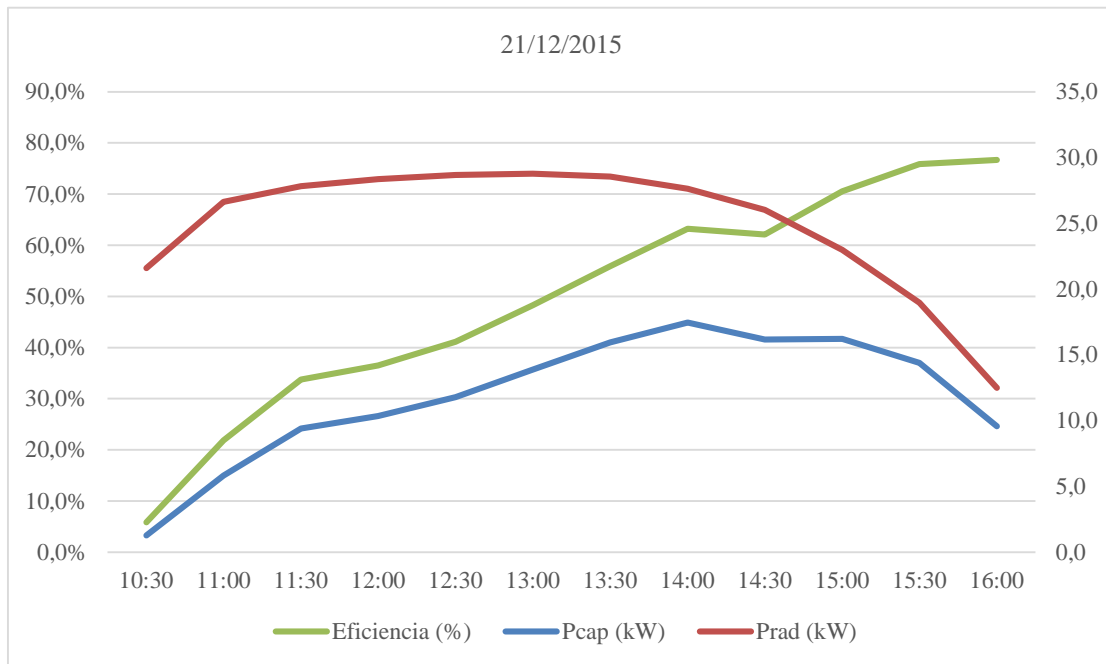


Figura 25 Perfil de temperatura de la instalación de colector cilindro-parabólico

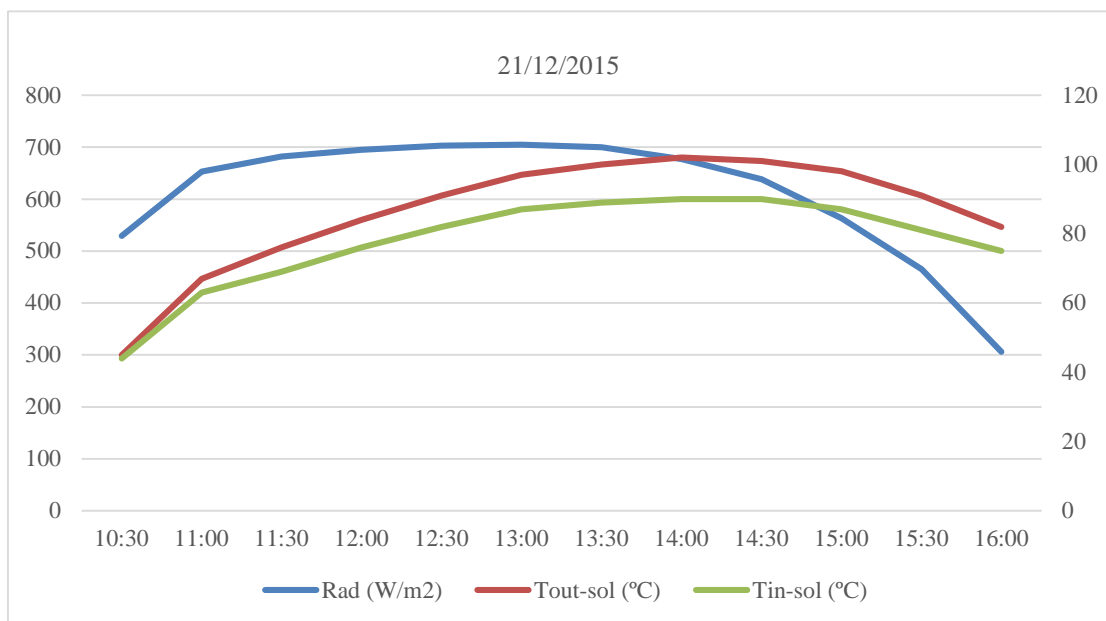


Figura 26 Eficiencia energética de la instalación de colector cilindro-parabólico

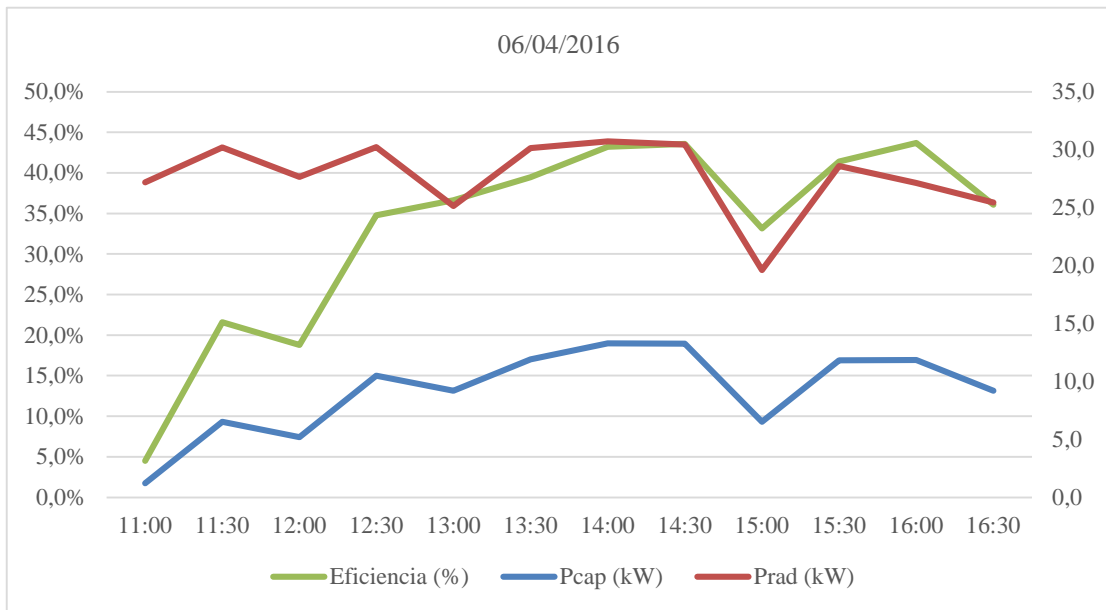


Figura 27 Perfil de temperatura de la instalación de colector cilindro-parabólico

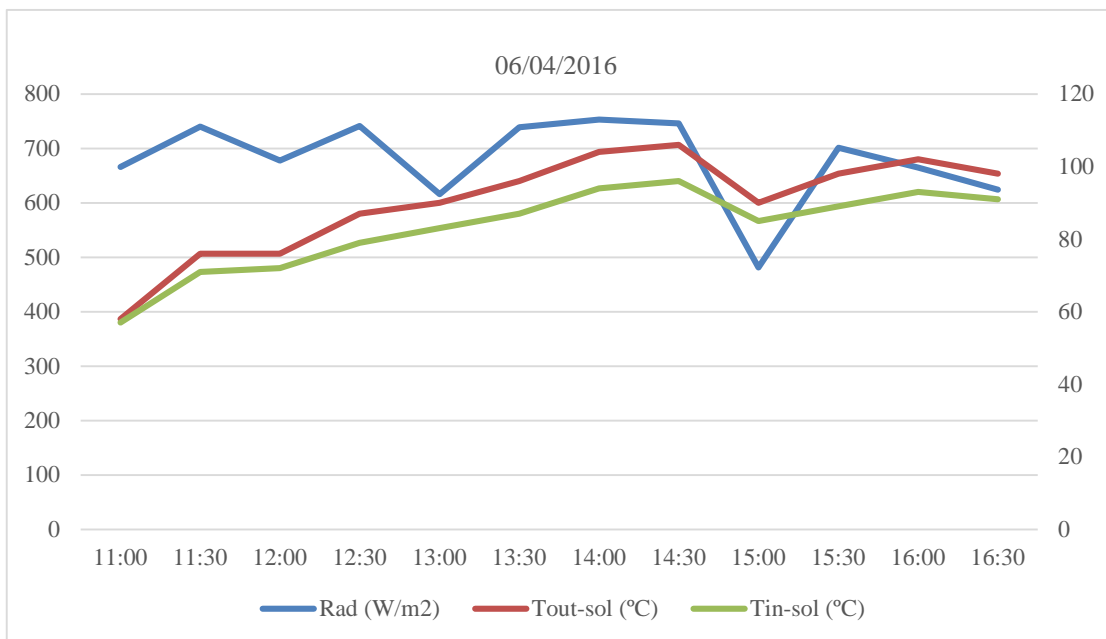


Figura 28 Eficiencia energética de la instalación de colector cilindro-parabólico

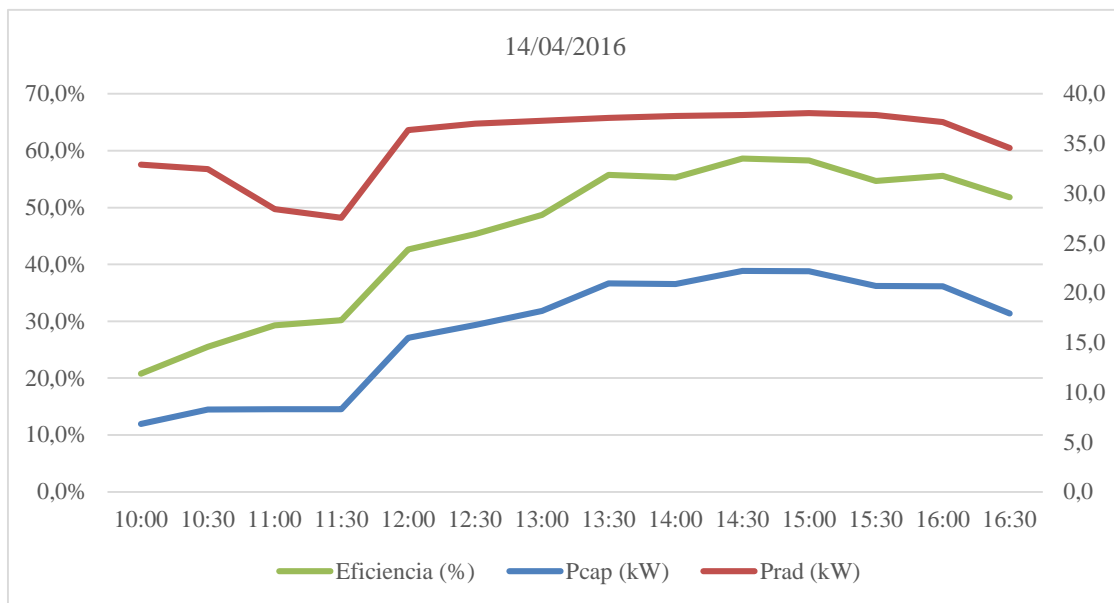
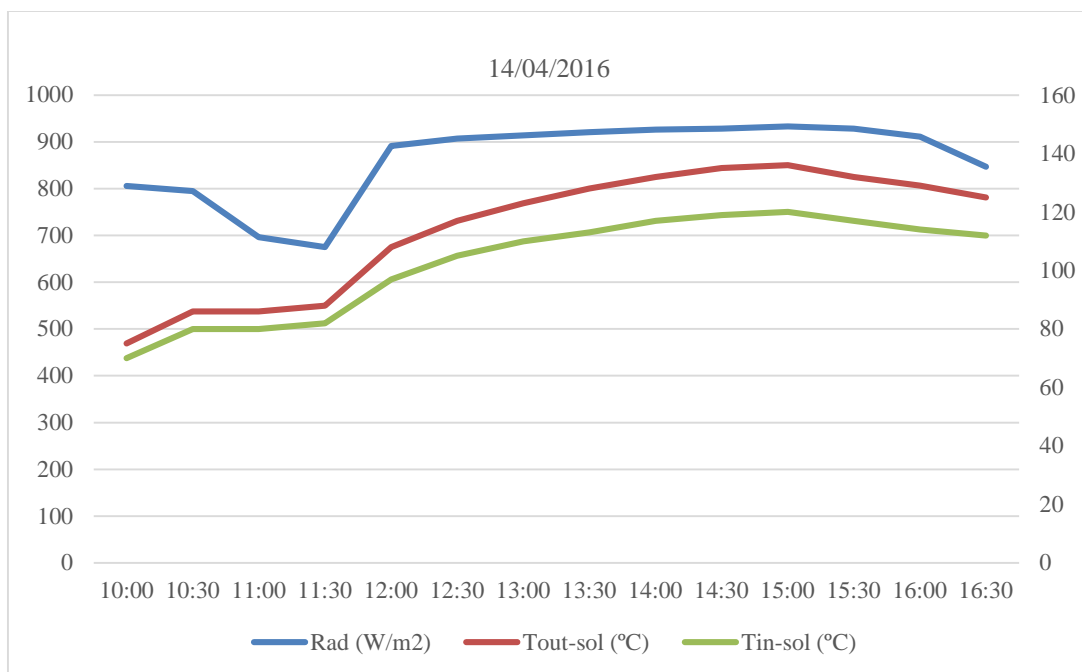


Figura 29 Perfil de temperatura de la instalación de colector cilindro-parabólico



4.2 Aprovechamiento térmico y eléctrico: cogeneración

Esta sección se basa en los resultados obtenidos para una planta piloto de la tecnología de concentración solar de disco parabólico, para la producción de energía eléctrica y la producción de ACS, implementada en el edificio público de la ETSEIB de la UPC en el municipio de Barcelona.

Los datos del edificio de oficinas son:

Location:	Barcelona, Spain
Ownership:	Politechnic University of Catalonia
Use:	Offices, classrooms, laboratories, workshop
Building surface:	47.000 m ² (approx.)
Electricity consumption:	2.528.038 kWh/y (approx.)

El principio de funcionamiento de la planta piloto consiste en la concentración de la energía solar en un punto focal para elevar la temperatura de un fluido, Helio, que a partir de un ciclo termodinámico produce un trabajo. Este trabajo se transforma en energía eléctrica gracias a un motor Stirling que se encuentra en la zona focal. El motor Stirling es de pistones libres con una potencia máxima de producción de 1 kW. El motor Stirling necesita un sistema de refrigeración para reducir la temperatura del helio y mantener el salto térmico necesario para realizar el ciclo termodinámico Stirling. Este sistema de refrigeración se realiza con un intercambio térmico con otro fluido, el cual eleva su temperatura para producir agua caliente sanitaria.

La planta piloto de la tecnología Disco Stirling abastece de energía eléctrica a los laboratorios de la facultad y el sistema de aprovechamiento térmico se ha conectado con el sistema convencional de ACS del gimnasio de la escuela.

El sistema solar instalado se compone principalmente de estos grandes bloques:

1) Sistema disco Stirling

Después de estudiar las diferentes opciones comerciales disponibles para la tecnología disco parabólico para la planta piloto, se optó por instalar el sistema compacto solar de la casa comercial INNOVA modelo Trinum.

Este sistema compacto Trinum se divide en las siguientes partes:

- **Óptica:** el colector solar está formado por 11 piezas de plástico recubiertas por una fina capa de aluminio.
- **Motor Stirling:** el sistema está equipado con un motor Stirling de pistón libre lineal (LFPEG, Linear Free Piston Engine Generator) con una potencia eléctrica de 1 kW producido por el MEC, Microgen Motor Corporation.
- **Sistema de seguimiento solar:** un sistema de seguimiento a dos ejes, el cual se encarga de enfocar y concentrar la radiación del Sol en el punto focal.
- **Estructura primaria:** el sistema está soportado sobre un pedestal o pie de acero galvanizado unido con otra estructura de acero que incluye el soporte para la óptica y el soporte de la zona focal donde está ubicado el motor Stirling y los servomotores del sistema de seguimiento. Dentro de la estructura vertical (pedestal), se ubican los conductos para conectar los circuitos hidráulicos y eléctricos. La estructura está provista de unidades de conexión con el fin de que sea más fácil de instalar y mantener el dispositivo. El circuito hidráulico está equipado con una válvula de aire.
- **Unidad de control eléctrico (ECU):** sistema que controla y gestiona el sistema. Incluye una pantalla de control, las protecciones eléctricas, una batería de 12V y la palca de control del motor Stirling. La placa de control se encarga que el sistema funcione correctamente. También dispone de sensores ambientales y el sistema de gestión del seguimiento del sol basado en un conjunto algoritmo con el reloj astronómico y las coordenadas GPS.
- **Unidad de control hidráulico (HCU):** esta unidad controla la distribución hidráulica e incluye:
 - Unidad de control hidráulico: permite la gestión de la energía térmica producida y que el sistema funciona en modo de seguridad.
 - El cuadro de distribución contiene la bomba hidráulica, medidor de flujo, sensores de temperatura y una válvula de motor de tres vías.
 - Aerotermo: Sistema de seguridad para evitar temperaturas superiores a los 70°C a la entrada del sistema de refrigeración del motor Stirling
 - Permite poner el circuito en el modo de seguridad, cuando el sistema alcanza cualquier temperatura por encima de los límites; la HCU conmuta el flujo de refrigerante desde el acumulador al calentador de aire, lo que permite la disipación de la energía térmica al aire.
 - Vaso de expansión de 5 litros

En el Anexo 4 se adjunta información técnica del sistema Trinum.

A continuación se muestra las principales características del captador solar:

Figura 30 Captador disco parabólico modelo Trinum de Innova

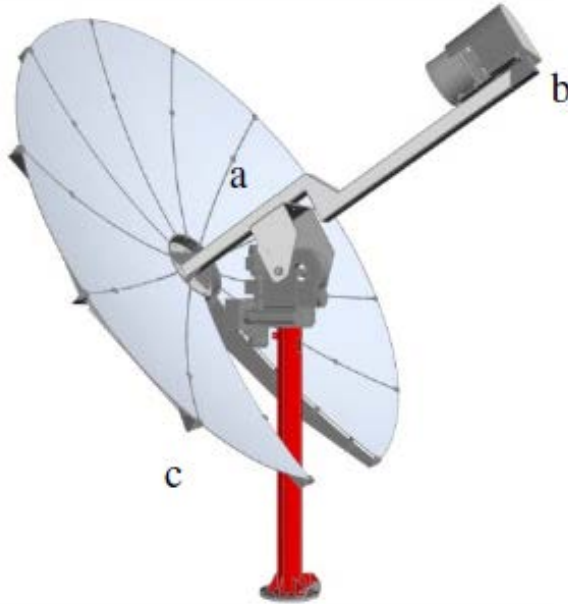


Tabla 14 Características técnicas del captador disco parabólico modelo Trinum de Innova

Characteristics	Value	Units
Thermal power output	3	kW
Electric power output	1	kW
Operation		
Hot water production at ΔT 30 °C	80	l/h
Hot water production at ΔT 40 °C	70	l/h
Hot water production at ΔT 50 °C	60	l/h
Electric power at DNI=750 W/m ²	1,00	kW
Electric power at DNI=650 W/m ²	0,65	kW
Electric power at DNI=600 W/m ²	0,30	kW
Heating water regulation	6 to 60	°C
Coolant flow	7 to 19	l/min
Maximum Working Pressure	6	bar
Environment conditions		
Maximum wind speed at operation	50	Km/h
Maximum wind in safe position	150	Km/h
Minimum operating temperature	-10	°C
Electric supply		
Electric peak consumption	400	W
Voltage supply	230	V AC
Frequency	50 +/- 0,5	Hz
Dimensions		

Reflector diameter	3750	mm
Operating area	D 5000 x H 4600	mm
Gross reflective surface	11,23	m ²
Net reflective surface	9,58	m ²
Weight	600	Kg
Height at close position	3000	mm

Ecuación 2 Curva de rendimiento eléctrico y térmico del captador solar disco parabólico modelo Trinum de Innova. Fuente: Innova

$$E_{elec} = 0.1247 G_{DNI} * A - 1.2156 \quad (12)$$

$$\rho_{th} = 0.55 \left(0.769 - 0.66 \frac{(T_m - T_e)}{G_{DNI}} - 0.008 \frac{(T_m - T_e)^2}{G_{DNI}} \right) \quad (13)$$

$$E_{Th} = \rho_{th} A_c G_{DNI} \quad (14)$$

Donde:

E_{elec}	Energía eléctrica producida(Wh)
E_{th}	Energía térmica producida (Wh)
A_c	Superficie de abertura del captador (m ²)
G_{DNI}	Direct Normal Irradiance (W/m ²)
ρ_{th}	Rendimiento térmico
T_m	Temperatura media del fluido caloportador (°C)
T_e	Temperatura de entrada del fluido (°C)

2) Sistema de acumulación

El sistema de refrigeración (producción solar térmica) necesita un depósito para almacenar la energía y utilizar esa energía cuando sea necesaria. En el depósito se ubica un serpentín donde se realiza el intercambio térmico entre los sistemas.

3) Sistema de soporte

Consiste en la estructura de soporte donde se sujetan la estructura primaria del sistema compacto Trinum.

4) Sistema de conversión de energía

Consiste en el intercambiador de placas externas de agua/agua y todos sus accesorios necesarios para su funcionamiento; sistema de circulación, circuito hidráulico de tuberías de cobre, aislamiento, válvulas, etc...

5) Sistema de monitorización

Consiste en la instalación de un gestor energético de la casa comercial Circutor modelo EDS Luxe. Con dicho componente se centraliza el almacenamiento de los datos obtenidos para todas las instalaciones ejecutadas en el proyecto DIDSOLIT y poder visualizarlas en la plataforma web.

En el Anexo 5 se adjunta:

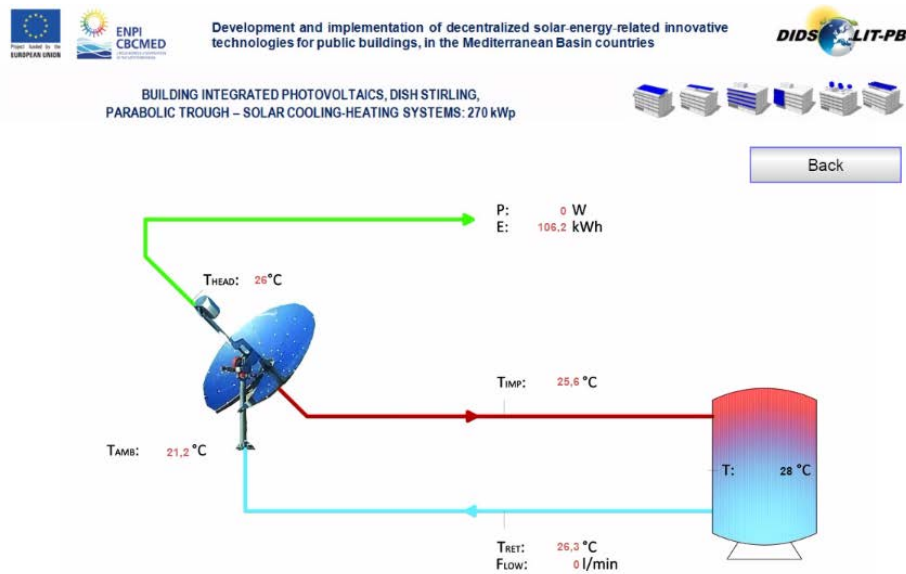
- A5.1 Implementación del captador solar en la cubierta del edificio
- A5.2 Esquema hidráulico del circuito solar

A continuación se presenta algunas fotos del sistema.



Los datos del sistema parabólico lineal se han tomado de la plataforma de monitorización del proyecto europeo DIDSOLIT, que corresponderían a la numeración 19 de la pantalla principal. (<http://monitoritzacio.dyndns.org:1234/html5/index.html>). Esta plataforma está basada en el programa POWER STUDIO SCADA de la casa comercial Circutor.

Figura 31 Esquema de la instalación solar del disco Stirling. Fuente: proyecto DIDSOLIT



Para estudiar el comportamiento de la planta piloto de la tecnología disco Stirling (DS), se han registrado los valores del campo solar para la producción eléctrica y térmica. En este caso no se han registrado valores de consumo del edificio, con lo que se podría haber calculado la fracción solar aportada por el sistema solar al sistema convencional de producción de ACS y calefacción del edificio.

En la Tabla 15 Variables registradas se presenta la lista de variables disponibles desde el servidor de la plataforma web de dicho proyecto para la instalación experimental:

Tabla 15 Variables registradas

Variable	Abreviatura	Unidades	Origen datos
Data tiempo	t	dd/mm/aa hh:mm:ss AM/PM	ECU
Temperatura ambiente	Tamb	°C	Sonda térmica - ECU
Producción eléctrica			
Potencia eléctrica	Pe	kW	ECU
Temperatura máxima del Stirling	Tset-head	°C	525 °C

Temperatura control Stirling	Tctrl-head	°C	Termopar tipo K - ECU
Temperatura límite Stirling	Tlim-heat	°C	Termopar tipo K - ECU
Producción térmica			
Temperatura entrada serpentín	Tin	°C	Sonda térmica - ECU
Temperatura salida serpentín	Tout	°C	Sonda térmica - ECU
Temperatura depósito	Tboiler	°C	Sonda térmica - ECU
Caudal agua	q	l/min	Medidor de cabal

La instalación empezó a operar a principios de Julio de 2015, por lo tanto, los datos a estudiar serán los referidos desde esa fecha hasta el 15/04/2016.

La datos recopilados de funcionamiento se han exportado a un archivo csv, para su posterior tratamiento con una hoja de cálculo Excel empleando tablas dinámicas y gráficas pivote.

En la Figura 32 y se muestra los datos recogidos en el período de funcionamiento, donde se puede observar varias anomalías en la lectura de los datos.

Figura 32 Gráfica de los datos de potencia y energía registrados de funcionamiento

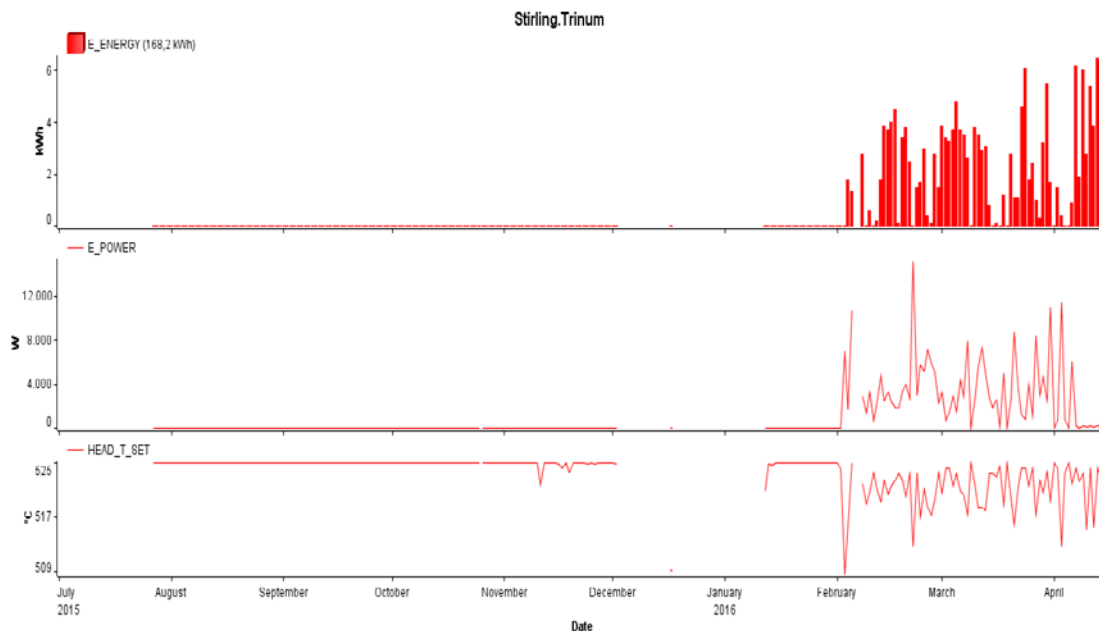
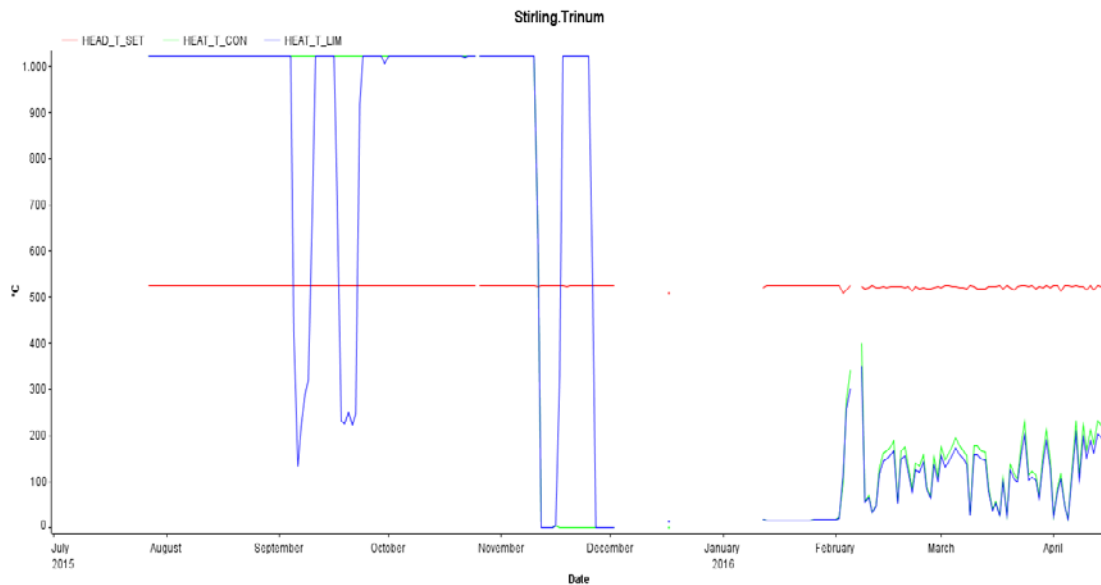


Figura 33 Gráfica de los datos de temperatura registrados de funcionamiento



El primer paso ha sido el tratamiento de datos, se han descartado todos los valores que el sistema no ha funcionado.

El sistema disco Stirling, unos días posteriores a la puesta en marcha surgió una incidencia en la placa de control, los valores de la temperatura de control y límite eran valores constantes de 1023°C. Esto era producido por que la placa electrónica que controla el motor Stirling tenía un amplificador saturado, una de las razones de este problema podría ser provocado por pequeñas tensiones de fuga en el cableado. El fabricante nos proporcionó tres recambios de la placa de control, debido a que dos placas de control ha fallado y hasta el mes de Febrero de 2016 el sistema no ha vuelto a funcionar.

Por lo tanto los datos a analizar corresponden desde a los meses de Febrero, Marzo y Abril del 2016.

A partir de estos datos se han aplicado los siguientes criterios de eliminación:

- 1) Horas de funcionamiento de 08:30-19:30
Se han descartado todos los valores que no están comprendidos entre esta franja horaria.
- 2) Las anomalías en el sistema solar
Se han eliminado todos los valores para una $Pe=0$
Se han eliminado todos los valores para una $Pe>1000$

De esta manera los datos útiles para poder estudiar el comportamiento del rendimiento de este tipo de captador son para los siguientes días:

08/02/2016	15/02/2016	17/02/2016
20/02/2016	21/02/2016	23/02/2016
25/02/2016	29/02/2016	01/03/2016
02/03/2016	03/03/2016	04/03/2016
05/03/2016	06/03/2016	07/03/2016
10/03/2016	11/03/2016	12/03/2016
13/03/2016	20/03/2016	23/03/2016
24/03/2016	30/03/2016	07/04/2016
08/04/2016	09/04/2016	11/04/2016
13/04/2016	14/04/2016	15/04/2016

El sistema no dispone de una sonda para la medición de la radiación normal directa, por lo tanto, no se puede determinar el rendimiento experimental que ha obtenido el sistema, al no poder calcular la energía y la potencia solar disponible en ese instante. En este caso sólo se ha determinado la potencia térmica y eléctrica producida por el sistema solar de cogeneración.

- Potencia térmica producida por el captador, P_t [kW]

$$P_t = q \cdot \rho \cdot ce \cdot \Delta T \text{ [kW]} \quad (15)$$

Donde:

q Caudal del fluido, [l/min]

ce Calor específico del agua [kJ/Kg K] $\rightarrow ce=4.186 \text{ kJ/kg K}$

ρ Densidad del agua [kg/l] $\rightarrow \rho = 1 \text{ kg/l}$

ΔT Salto térmico del aceite [K]

A continuación se muestra la representación gráfica de los resultados obtenidos por el sistema experimental para los días siguientes:

- 08/02/2016
- 05/03/2016
- 30/03/2016
- 09/04/2016
- 13/04/2016

Figura 34 Potencia eléctrica y térmica producida por el disco Stirling

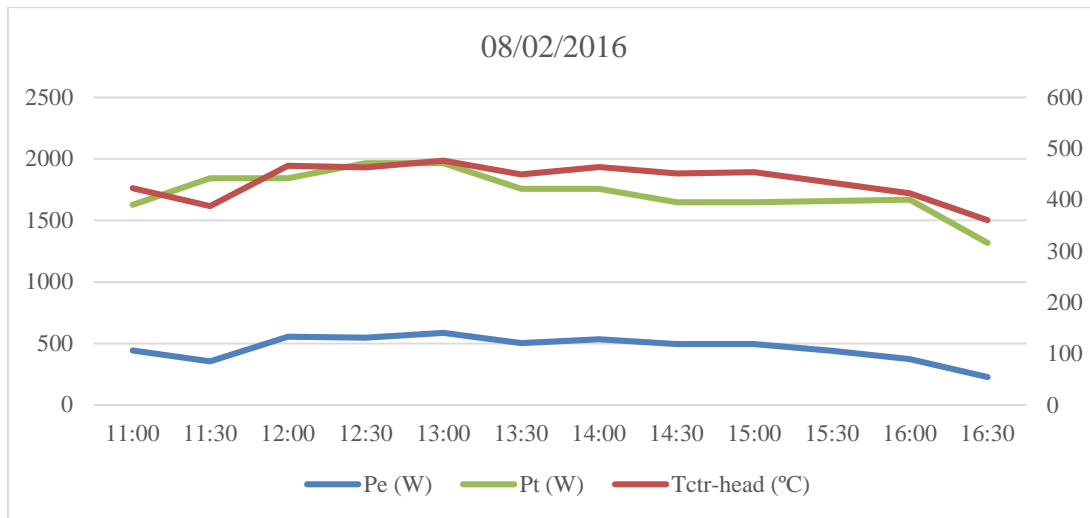


Figura 35 Perfil de temperatura del fluido del sistema de refrigeración del disco Stirling

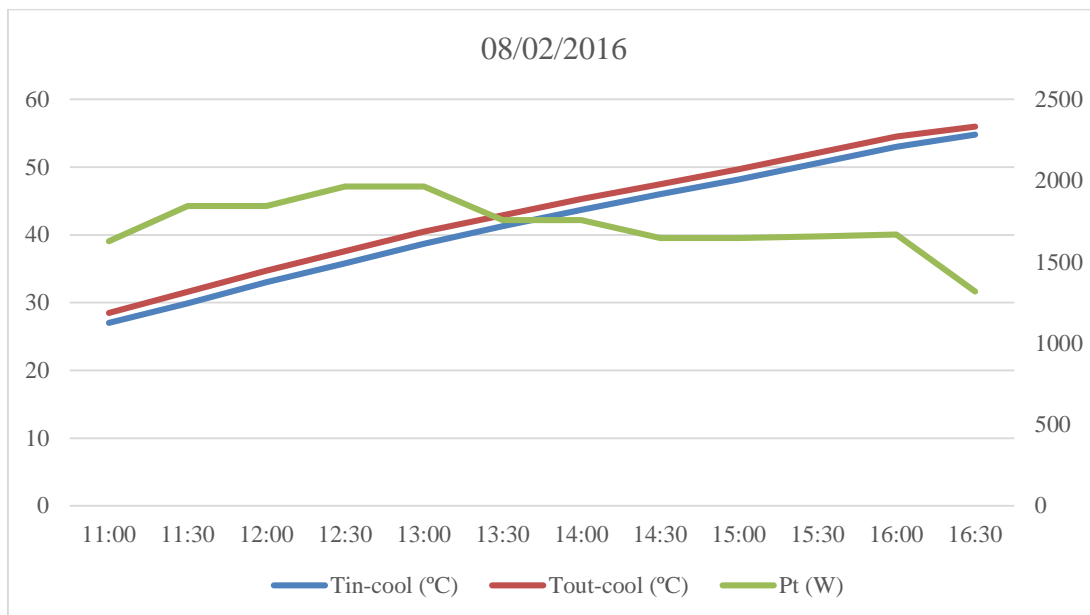


Figura 36 Potencia eléctrica y térmica producida por el disco Stirling

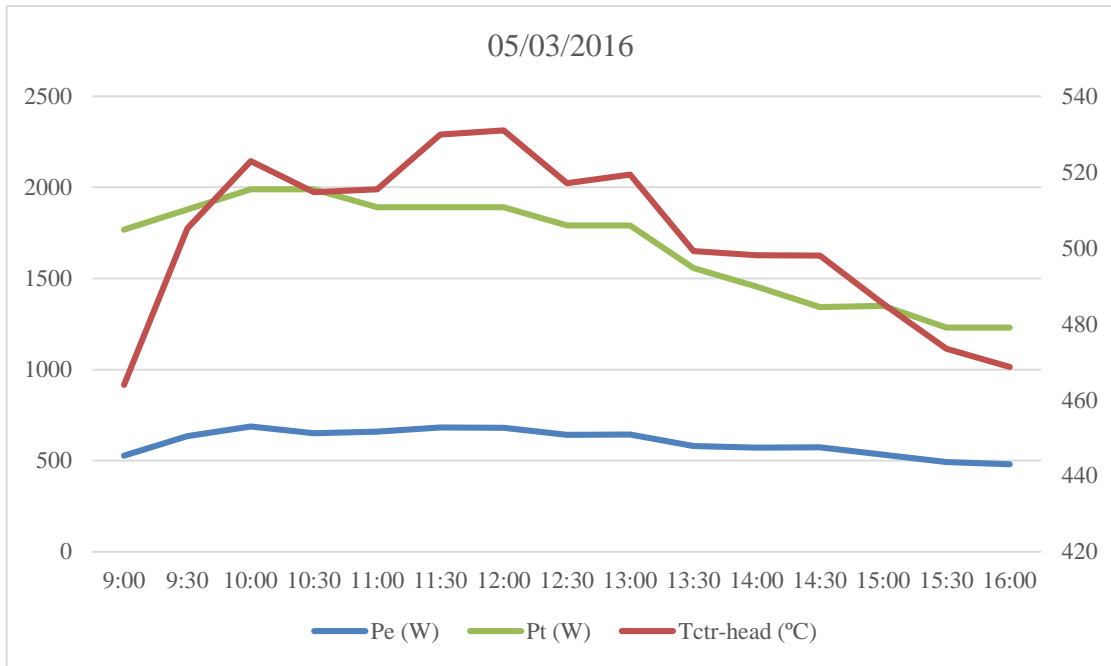


Figura 37 Perfil de temperatura del fluido del sistema de refrigeración del disco Stirling

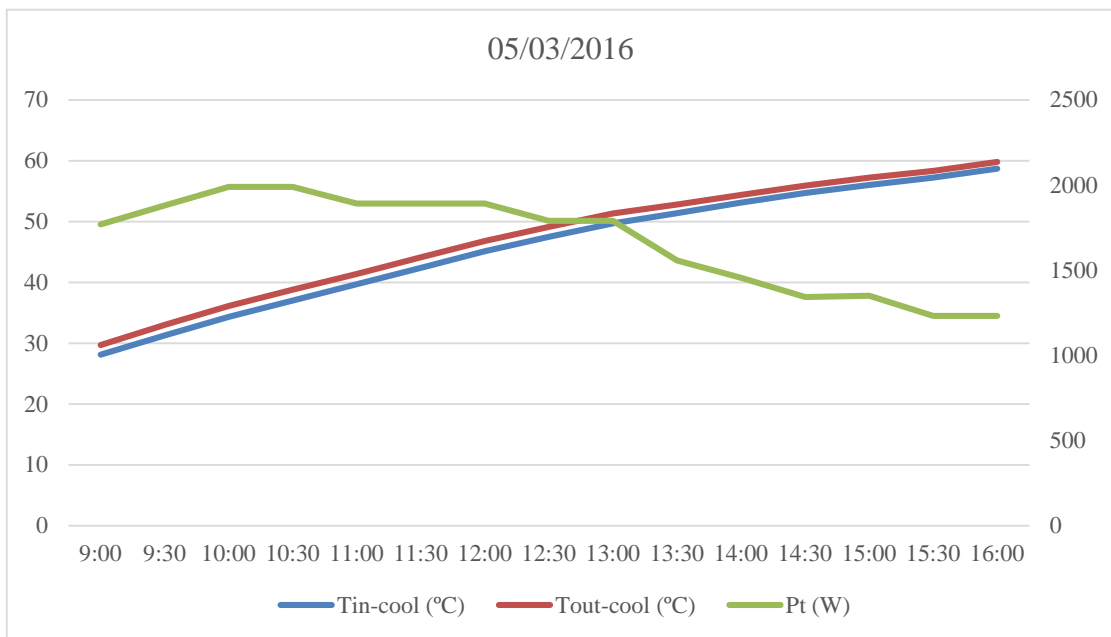


Figura 38 Potencia eléctrica y térmica producida por el disco Stirling

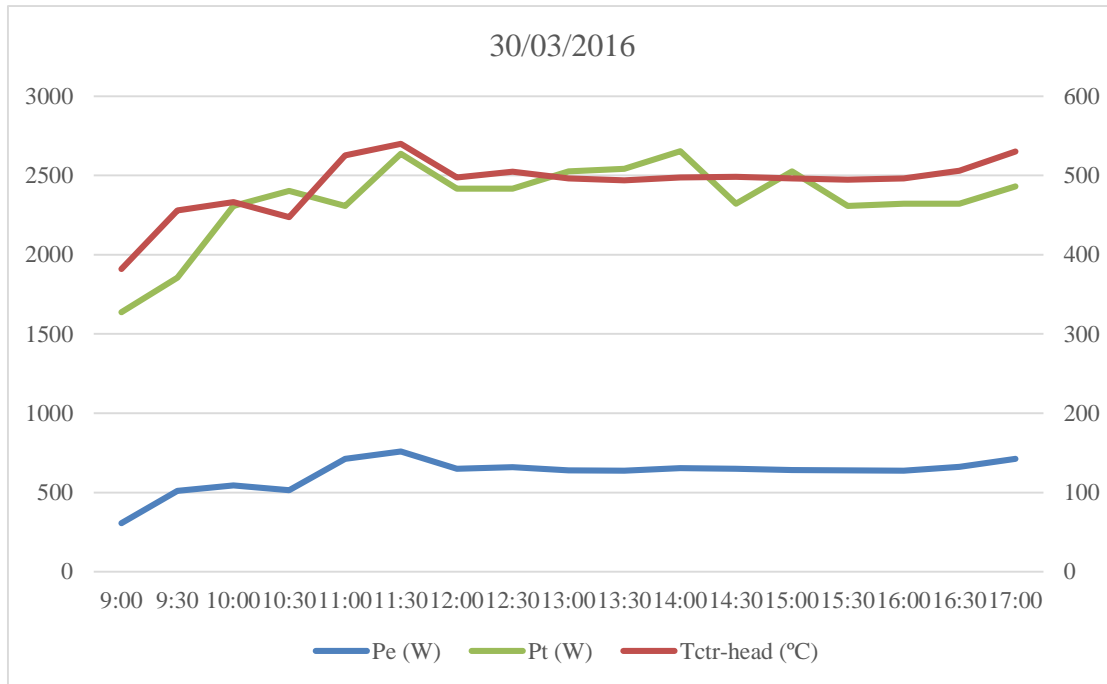


Figura 39 Perfil de temperatura del fluido del sistema de refrigeración del disco Stirling

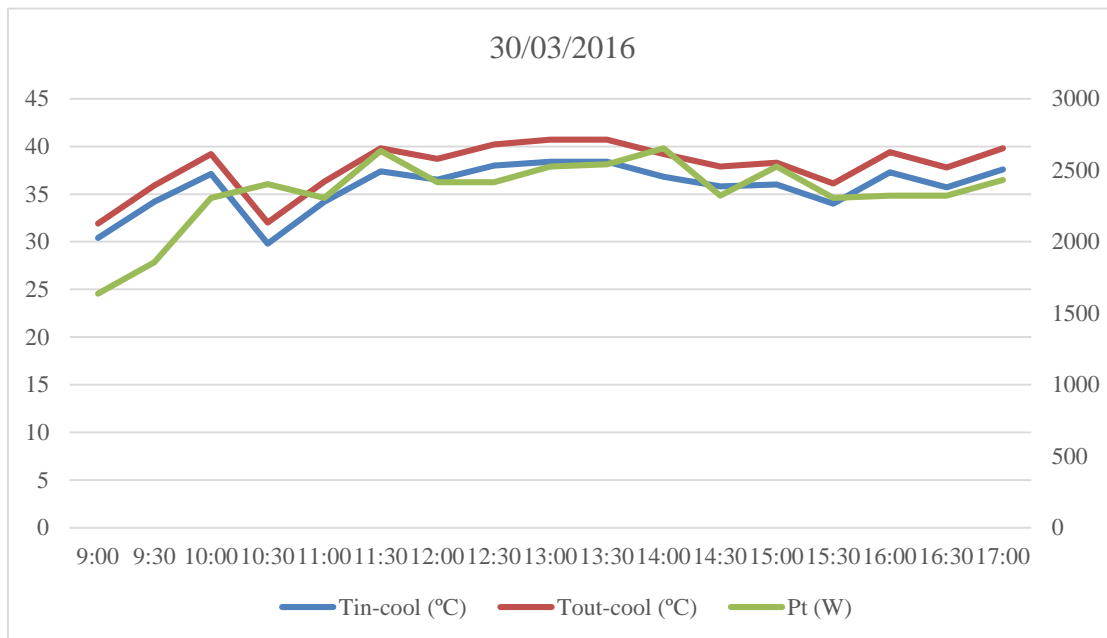


Figura 40 Potencia eléctrica y térmica producida por el disco Stirling

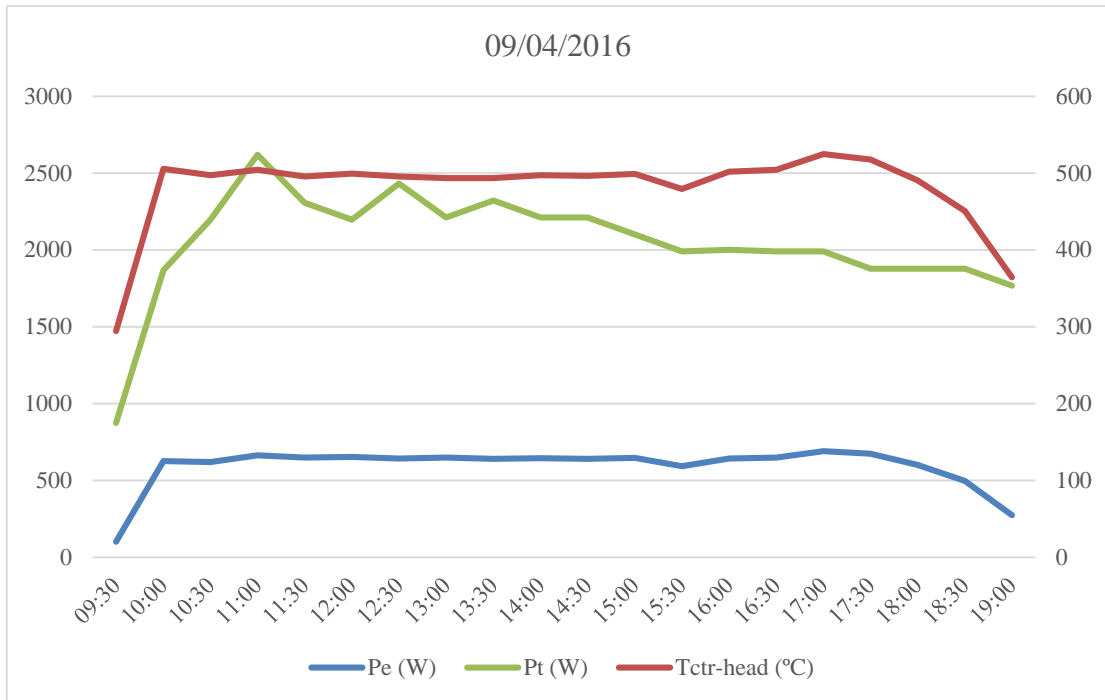


Figura 41 Perfil de temperatura del fluido del sistema de refrigeración del disco Stirling

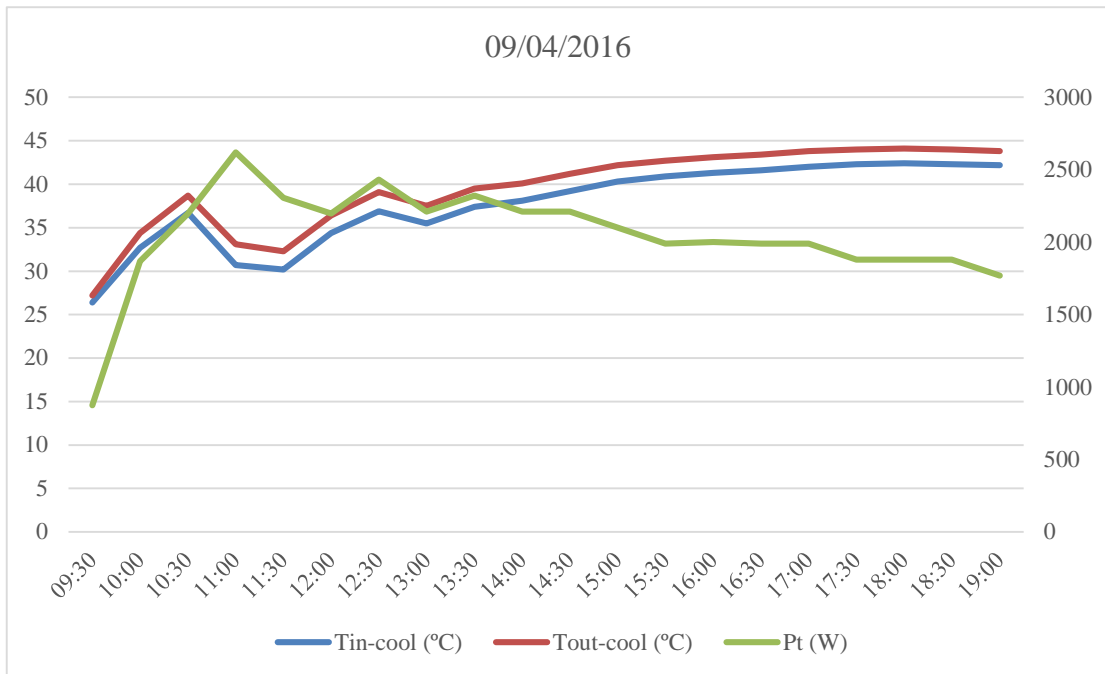


Figura 42 Potencia eléctrica y térmica producida por el disco Stirling

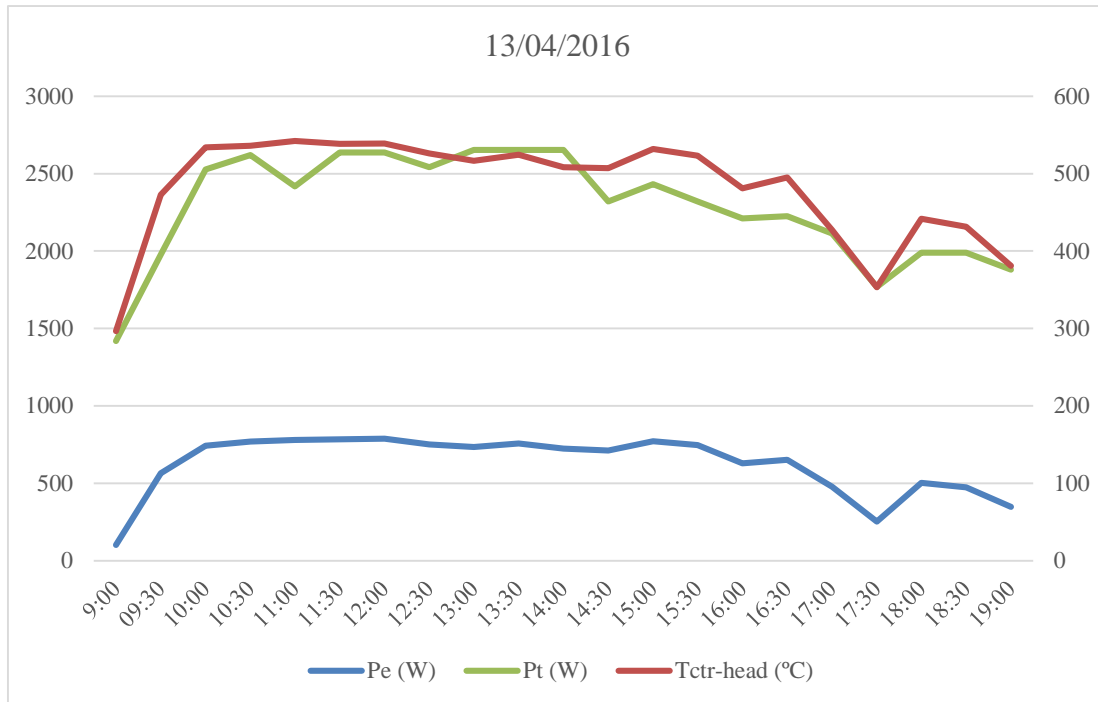
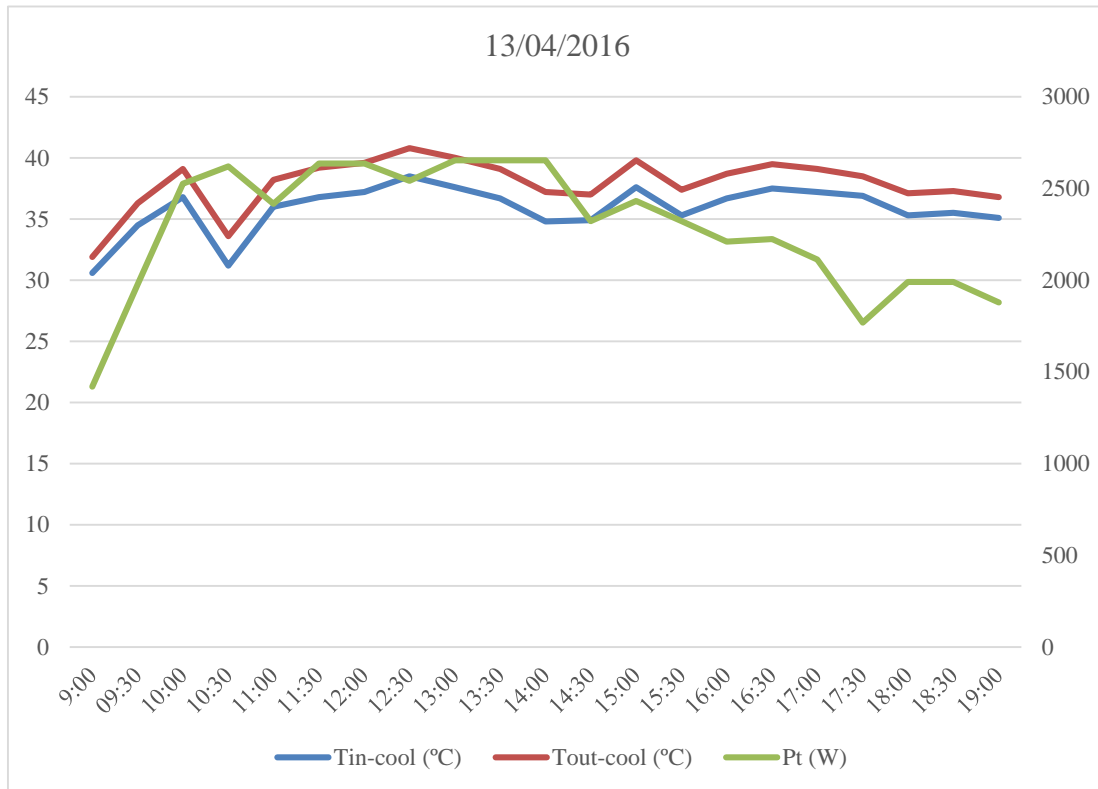


Figura 43 Perfil de temperatura del fluido del sistema de refrigeración del disco Stirling



5 CONCLUSIONES

Las tecnologías solares tienen un gran potencial de implementación en el sector de la edificación para abastecer las necesidades térmicas y eléctricas.

Las tecnologías solares pasivas son de más fácil aplicación en edificios de nueva construcción que en edificios ya existentes. En los edificios de nueva construcción, se puede realizar el diseño del edificio bajo estrategias de arquitectura bioclimática que no incrementan mucho sus costes de ejecución. En cambio en edificios ya existentes los costes de ejecución se elevan más al tener limitaciones arquitectónicas en su implementación.

Las tecnologías solares pasivas podrían abastecer las necesidades de climatización (calefacción y refrigeración) de los edificios, las cuales representan el mayor consumo en ellos.

La tecnología solar térmica de baja temperatura es una tecnología madura y con un mercado consolidado para la producción de agua caliente sanitaria y la producción de calefacción por suelo radiante.

La tecnología solar térmica de media/alta temperatura es una tecnología todavía en proceso de maduración. El mercado para la implementación de dicha tecnología en los edificios está limitado por la poca oferta comercial de captadores de concentración de pequeño tamaño aptos para ubicar en las superficies disponibles de los edificios. Estas tecnologías podrían aplicarse con éxito para la producción de agua caliente sanitaria, climatización con máquinas de absorción y generación de energía eléctrica mediante una turbina de gas o un motor Stirling.

La tecnología fotovoltaica es una tecnología madura y sus costes en los últimos años se han reducido haciéndola cada vez más competitiva con los sistemas convencionales. La implementación de esta tecnología en los edificios tiene un gran potencial, centrándose últimamente en los sistemas integrados BIPV, tanto en los edificios de nueva construcción como en los edificios a existentes.

6 BIBLIOGRAFÍA/REFERENCIAS

Referencias

- [1] Estudios, informes y estadísticas, Balances energéticos, Balances de energía final 1990-2013, IDAE,
<http://www.idae.es/index.php/idpag.802/recategoria.1368/remenu.363/mod.pags/mem.detalle>
- [2] “Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España”, 2014, Ministerio de Fomento.
- [3] “Análisis del consumo energético del sector residencial en España”, proyecto SECH-SPAHOUSEC, 2011, IDAE.
- [4] Irradiation data for every place on the earth. <http://www.meteonorm.com/>
- [5] Memoria anual IDAE 2001,
http://idae.electura.es/publicacion/313/memoria_anual_idae_2001
- [6] “European passive solar handbook”, editado por la Comisión de la UE, 1986
- [7] “Evaluación del potencial de climatización con energía solar térmica en edificios”. Estudio técnico PER 2011 – 2020, IDAE 2011
- [8] “Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables”, José A. C. González, Roque C. Pérez, Antonio C. Santos, Manuel-A.C. Gil, Pearson educación, Madrid, 2009.
- [9] “Sistemas solares térmicos. Diseño e Instalación”, Dr. Felix A. PAuser, Karl-Heinz Remmers, Martin Schnauss, Progensa-Censolar, Sevilla, 2005.
- [10] “Energía Solar Térmica de Concentración. Perspectiva mundial 2009”, Informe elaborado por Estela, Greenpeace International y Solar PACES, 2009.
- [11] “The Future of Solar Energy”, Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2015.
- [12] “Handbook for Solar Photovoltaic (PV) Systems”, ISBN: 978-981-08-4462-2
- [13] “BIPV Status report 2015, SUPSI – SEAC”, Francesco Frontini, Pierluigi Bonomo, Anatoli Chatzipanagi from Swiss BIPV Competence Centre (SUPSI) and Guus Verberne, Menno van den Donker, Kostas Sinapis, Wiep Folkerts from Solar Energy Application Centre (SEAC), 2015
- [14] “Hacia una nueva generación de edificios de consumo energético casi nulo y cero emisiones”, Proyecto Singular Estratégico sobre ARquitectura Bioclimática y FRIO SOLar - PSE-ARFRISOL, CIEMAT, 2014.

Bibliografía

“Eficiencia energética en los edificios”, José María Fernández Salgado, AMV Ediciones, Madrid, 2011

“Energía solar fotovoltaica”, M. Castro, J. Carpio Ibáñez, R. Guirado Torres, A. Colmenar Santos, L. Dávila Gómez, Progensa-Censolar, Sevilla, 2000

“Sistemas solares térmicos. Diseño e Instalación”, Dr. Felix A. PAuser, Karl-Heinz Remmers, Martin Schnauss, Progensa-Censolar, Sevilla, 2005

“Solar technologies for buildings”, Ursula Eicker, Wiley, England, 2003

“European passive solar handbook”, editado por la Comisión de la UE, 1986

“Passive solar handbook”, volum I, editado por Air Force Institute of Technology (U.S.), Civil Engineering School, 1980

7 Acta de evaluación